

# **RUÍDOS DE PERCUSSÃO EM SALAS DE AULA**

## **O caso da FEUP**

**VITOR HUGO RIBEIRO CARVALHO**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES**

---

Orientador: Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho

JULHO DE 2015

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2014/2015**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2014/2015 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A meus Pais

*Conhecimento é Poder*  
*Francis Bacon*



## **AGRADECIMENTOS**

Ao concluir este trabalho desejo mostrar toda a minha gratidão a todos aqueles que tornaram possível a sua realização, salientando um especial apreço:

Ao Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho pela paciência, a orientação, a ajuda e conselhos prestados sempre que necessário;

Ao Engenheiro António Eduardo Batista da Costa pela amizade e principalmente pelo apoio prestado durante as medições do caso de estudo e conselhos fornecidos;

Aos meus amigos e colegas pela ajuda, companheirismo e apoio em todas as horas;

E finalmente aos meus pais que me permitiram a realização deste curso e apoiaram incessantemente em todas as horas.



## RESUMO

O presente trabalho destina-se a analisar a transmissão de ruídos de percussão em salas de aula, sendo que para isso se tomou como caso de estudo as salas de aulas da FEUP.

A acústica é uma das mais importantes características de uma sala de aula como facilmente se percebe ao analisar as atividades que aí se processam, sendo o isolamento a ruídos de percussão um dos mais importantes fatores para determinar a “qualidade acústica” dessa sala.

Procedeu-se inicialmente neste trabalho a uma descrição dos principais parâmetros e características acústicas para a perceção do trabalho que a seguir é feito e que engloba as propriedades mais básicas do som como a pressão ou a frequência, mas também conceitos mais complexos como o tempo de reverberação, a absorção, transmissão e reflexão sonora e o conceito de isolamento sonoro.

Foi feita também uma análise da legislação portuguesa atual e os efeitos que a última revisão do regulamento teve na análise dos ruídos de percussão, ou seja, comparou-se as diferenças entre os parâmetros  $L'_{nT,w}$  e  $L'_{n,w}$ , para além de se calcular também os valores de  $I_p$  que corresponde ao índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão inscrito na legislação aquando da construção e projeto da faculdade. Procedeu-se ainda a uma comparação da atual legislação Portuguesa com a utilizada em outros países.

De forma a estudar o isolamento sonoro a ruídos de percussão de salas de aulas procedeu-se a uma caracterização pormenorizada de cinco lajes que separam salas de aula da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, uma vez que é este o sistema construtivo sobre o qual ocorrem as transmissões diretas de ruídos de percussão. Procedeu-se então à medição *in situ* do seu isolamento sonoro a ruídos de percussão e sua conformidade com o regulamento em vigor, com o regulamento imediatamente anterior e com o regulamento em vigor à data da construção. Para além desta análise ao cumprimento do regulamento foi feito também o estudo do efeito do volume do compartimento recetor nos resultados das medições do isolamento sonoro a ruídos de percussão.

O cálculo dos valores de  $L'_{nT,w}$  mostrou uma variação do índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão, padronizado entre 57 e 65 dB, o que demonstra que todos os casos cumprem a legislação atual (RRAE de 2008). Por sua vez no cálculo do índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão normalizado obtiveram-se valores entre 68 e 75 dB, o quer dizer que apenas uma das cinco salas cumpre o limite regulamentar do RRAE de 2002. Esta sala cumpridora encontra-se no limite do que é considerado regulamentar uma vez que a legislação prevê o uso de uma incerteza de -3 dB que deve ser somada aos valores obtidos de  $L'_{n,w}$ .

Os resultados obtidos mostram que o novo regulamento é menos exigente uma vez que os valores de  $L'_{nT,w}$  são inferiores a  $L'_{n,w}$  para o tipo de volumes dos apresentados pelas salas da FEUP e os limites regulamentares são iguais nos dois últimos regulamentos. Ora este desfasamento torna-se cada vez mais elevado quanto maior é o volume da sala recetora.

Quando se considera o cálculo de  $I_p$  obtiveram-se valores entre 75 e 79 dB, fazendo com que nenhuma das salas cumpra o limite regulamentar do regulamento em vigor para o projeto da faculdade.

Considerando a legislação atual de alguns países estrangeiros notou-se claramente que a legislação Portuguesa atual é mais permissiva que na quase totalidade dos países analisados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Acústica, percussão, lajes, regulamentação, salas de aula





## ABSTRACT

The present work aims to study the impact sound transmission in classrooms and for this is taken as a case of study the FEUP classrooms.

Acoustics is one of the most important features of a classroom as is easily seen when analysing the activities that are processed there. The impact noise insulation is one of most important characteristic to analyse the acoustic quality of a room.

In the initial pages of this work a description of main parameters and acoustic's characteristics is done to enable the perception of the following work. The most basic properties of sound are described, as the pressure or frequency, but also more complex concepts such as reverberation time, sound absorption, transmission, reflection and the concept of sound insulation.

It was made an analysis of the current Portuguese legislation and the effects that the latest revision of the Regulation on the analysis of percussion noise, comparing the differences between values of  $L'_{nT,w}$  and  $L'_{n,w}$ . It was calculated the value of  $I_p$  that correspond to the impact sound insulation index enrolled in law at time of construction and design. A comparison of the current Portuguese legislation with the used in other countries is presented.

In order to make a correct analysis of the problem a detailed characterization of five classrooms and type of floor used in the classrooms of the Faculty of Engineering, University of Porto was done since this is the system on which focus the study. *In situ* measurements of impact sound insulation and their compliance with current regulation and with the previous regulation was done. Apart from this analysis, it was also made the study of the effect of the receiver compartment volume on the measurement results of impact sound insulation.

The results show that values of  $L'_{nT,w}$  are between 57 and 65 dB, that means a fulfillment of actual legislation (RRAE 2008). The values of  $L'_{n,w}$  are between 68 and 75 dB, that means the fulfillment of RRAE 2002 of only one of five classrooms.

These results allow the conclusion that the more recent regulation (RRAE 2008) is less demanding. The receiving classrooms with higher volume have biggest differences between values of  $L'_{nT,w}$  and  $L'_{n,w}$ .

The values of  $I_p$  are between 75 and 79 dB and any classroom fulfill the requirements of RGR 1987, the legislation ruling during the project of the building.

The analyses of others countries legislation show that Portuguese legislation is very permissive.

**KEYWORDS:** Acoustic, impact, slab, regulation, classroom



## ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS</b>	i
<b>RESUMO</b>	iii
<b>ABSTRACT</b>	v
<b>ÍNDICE GERAL</b>	vii
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	xi
<b>ÍNDICE DE QUADROS</b>	xiii
<b>SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS</b>	xv
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	1
1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS	1
1.2. ESTRUTURA DA TESE	1
<b>2. CONCEITOS E DEFINIÇÕES</b>	3
2.1. SOM E RUÍDO	3
2.2. OUVIDO HUMANO	4
2.3. PROPRIEDADES BÁSICAS DO SOM	6
2.3.1. PRESSÃO SONORA	6
2.3.2. INTENSIDADE E POTÊNCIA SONORA	8
2.3.3. FREQUÊNCIA, COMPRIMENTO DE ONDA E CELERIDADE	9
2.3.4. DURAÇÃO DO SOM	12
2.3.5. CURVAS DE PONDERAÇÃO	12
2.4. ABSORÇÃO, REFLEXÃO SONORA E TRANSMISSÃO SONORA	13
2.5. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	17
2.6. ISOLAMENTO SONORO	18
2.6.1. CONCEITO	18
2.6.2. ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS DE CONDUÇÃO AÉREA	18
2.6.3. ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS DE PERCUSSÃO	19
2.7. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA	19
<b>3. Ruídos de percussão</b>	21
3.1. CAUSAS DOS RUÍDOS DE PERCUSSÃO EM ESCOLAS	21

<b>3.2. CÁLCULO DE ÍNDICE DE ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS DE PERCUSSÃO .....</b>	<b>22</b>
3.2.1. HISTÓRIA DOS ÍNDICES .....	22
3.2.2. DETERMINAÇÃO DO ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS DE PERCUSSÃO SEGUNDO NP EN ISO 717-2 .....	23
3.2.2.1. Equipamento .....	23
3.2.2.2. Metodologia a utilizar no cálculo do isolamento sonoro a ruídos de percussão .....	24
3.2.2.3. Termos de adaptação espectral .....	25
3.2.2.4. Índice de redução sonora a ruídos de percussão .....	26
3.2.3. DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE ISOLAMENTO SONORO (IIC) SEGUNDO NORMA ASTM E 989 .....	26
3.2.4. CURVAS DE REFERÊNCIA PARA CÁLCULO DO ISOLAMENTO SONORO DE RUÍDOS DE PERCUSSÃO .....	28
3.2.4.1. Curva da norma ISO 717-2 .....	28
3.2.4.2. Curva de Gösele .....	28
3.2.4.3. Curva de Fasold .....	29
3.2.4.4. Curva de Bodlund .....	30
3.2.4.5. Curva de Hagberg .....	31
3.2.5. FONTES DE PERCUSSÃO ALTERNATIVAS - JAPANESE RUBBER BALL .....	33
3.2.6. COMPARAÇÃO ENTRE ÍNDICES OBJETIVOS E SUBJETIVOS NA ANÁLISE DO ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS DE PERCUSSÃO .....	33
3.2.7. INFLUÊNCIA DO RUÍDO AÉREO CRIADO PELA MÁQUINA DE PERCUSSÃO NORMALIZADA .....	34
3.2.8. COMPARAÇÃO DOS ÍNDICES UTILIZADOS NA EUROPA .....	34
<b>3.3. TRANSMISSÕES DIRETAS E MARGINAIS DE RUÍDOS DE PERCUSSÃO .....</b>	<b>35</b>
<b>3.4. MODELOS DE PREVISÃO DE ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS DE PERCUSSÃO .....</b>	<b>36</b>
3.4.1. MÉTODO DE CREMER .....	36
3.4.2. MÉTODO SIMPLIFICADO .....	36
<b>3.5. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS DE PERCUSSÃO .....</b>	<b>37</b>
 <b>4. SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS PARA REDUÇÃO DE RUÍDOS DE PERCUSSÃO .....</b>	 <b>39</b>
<b>4.1. SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS PARA PAVIMENTOS .....</b>	<b>39</b>
4.1.1. ALCATIFA .....	39
4.1.2. LAJE FLUTUANTE .....	40
4.1.3. PAVIMENTO FLUTUANTE .....	41
4.1.4. TETO SUSPENSO .....	42
<b>4.2. ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS DE PERCUSSÃO DE ALGUMAS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS ..</b>	<b>42</b>

<b>5. IMPORTÂNCIA DE BOAS CONDIÇÕES ACÚSTICAS EM SALAS DE AULA</b>	45
5.1. IMPORTÂNCIA PARA TODOS OS UTENTES E CONDIÇÕES EXISTENTES	45
5.2. IMPORTÂNCIA PARA OS ALUNOS	47
5.3. IMPORTÂNCIA PARA OS PROFESSORES	48
 <b>6. LEGISLAÇÃO</b>	49
6.1. LEGISLAÇÃO PORTUGUESA	49
6.2. LEGISLAÇÃO ESTRANGEIRA	50
 <b>7. CASO DE ESTUDO – SALAS DE AULA DA FEUP</b>	55
7.1. DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO E ESPAÇOS ANALISADOS	55
7.2. METODOLOGIA	58
7.2.1. EQUIPAMENTOS	58
7.2.2. PROCEDIMENTOS	59
7.3. RESULTADOS OBTIDOS	61
7.3.1. ÍNDICE DE CASOS ESTUDADOS	61
7.3.2. CASO 1 (EMISSOR B 218 E RECETOR B 017)	61
7.3.3. CASO 2 (EMISSOR B 111 E RECETOR B 016)	63
7.3.4. CASO 3 (EMISSOR B 215 E RECETOR B 109)	64
7.3.5. CASO 4 (EMISSOR B 317 E RECETOR B 215)	65
7.3.6. CASO 5 (EMISSOR B 319 E RECETOR B 216)	67
7.4. ANÁLISE DE RESULTADOS	68
7.4.1. ANÁLISE DE CUMPRIMENTO DE REGULAMENTOS PORTUGUESES E INTERNACIONAIS	68
7.4.2. USO DE UMA GAMA ALARGADA DE FREQUÊNCIAS	73
7.4.3. ANÁLISE DO EFEITO DO VOLUME DO COMPARTIMENTO RECETOR	76
7.4.4. PROPOSTA DE MELHORIA	78
 <b>8. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS</b>	81
8.1. CONCLUSÕES	81
8.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	82

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....83**

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Sucessivas compressões e rarefações de uma onda sonora (adaptado de [2]) .....	3
Figura 2.2 – Exemplos de situações classificadas como som (esquerda) ou ruído (direita) (adaptado de [3]) .....	4
Figura 2.3 – Divisão do ouvido humano (ouvido externo, médio e interno) e seus principais constituintes (adaptado de [4]) .....	4
Figura 2.4 – Representação dos ossículos (martelo, bigorna e estribo) e sua ligação à janela oval (adaptado de [4]) .....	5
Figura 2.5 – Representação esquemática do ouvido interno humano e dos seus constituintes (adaptado de [4]) .....	5
Figura 2.6 – Variação da pressão com o tempo [5] .....	6
Figura 2.7 – Comparação da pressão com o nível de pressão sonora de algumas atividades (adaptado de [6]) .....	7
Figura 2.8 – Soma de níveis de pressão sonora (adaptado de [7]).....	7
Figura 2.9 – Comparação de pressão eficaz (RMS) com pressão máxima (adaptado de [8]).....	8
Figura 2.10 – Relação entre potência (P), intensidade (I) e pressão (P <sub>2</sub> ) (adaptado de [9]) .....	8
Figura 2.11 – Classificação dos sons quanto à sua frequência (sons audíveis, infra-sons e ultra-sons) (adaptado de [6]) .....	10
Figura 2.12 – Nível de pressão sonora para bandas de 1/1 oitava e 1/3 oitava [1] .....	11
Figura 2.13 – Diferenças entre as variações de um ruído contínuo (à esquerda) e intermitente (direita) [5].....	12
Figura 2.14 – Curvas de ponderação (filtros) (adaptado de [2]) .....	13
Figura 2.15 – Diferentes caminhos que o som pode tomar ao encontrar um obstáculo [6] .....	13
Figura 2.16 – Tubo de ondas estacionárias para determinação de $\alpha$ (adaptado de [2]).....	14
Figura 2.17 – Comparação do poder de absorção dos três tipos de materiais em função da frequência [1].....	15
Figura 2.18 – Ressonador [2].....	15
Figura 2.19 – Materiais fibrosos e porosos (adaptado de [13]) .....	15
Figura 2.20 – Exemplo de uma membrana [13].....	16
Figura 2.21 – Tempo de reverberação teórico (esquerda) e extrapolado (direita) [1] .....	17
Figura 3.1 – Situação de uma sala de aula com bom isolamento a ruídos de percussão (adaptado de [15]) .....	21
Figura 3.2 – Máquina de percussão normalizada [20].....	23
Figura 3.3 – Exemplo de determinação de IIC (curva L(f) a tracejado e curva C(f)+T a traço contínuo) [27].....	27
Figura 3.4 – Curva de referência ISO para determinação do isolamento sonoro a ruídos de percussão [25].....	28

Figura 3.5 – Curva sugerida por Gösele para determinação do índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão [30].....	29
Figura 3.6 – Curva sugerida por Fasold para determinação do índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão [30].....	30
Figura 3.7 – Comparação da curva de referência sugerida por Bodlund para determinação do índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão com a curva utilizada na norma ISO 717-2 (adaptado de [33]) .....	31
Figura 3.8 – Primeira (traço contínuo) e segunda (a traço interrompido) curvas de Hagberg para determinação de isolamento sonoro a ruídos de percussão (adaptado de [34]).....	32
Figura 3.9 – <i>Japanese rubber ball</i> (adaptado de [35]).....	33
Figura 3.10 – Transmissão de ruídos de percussão por caminho direto e marginal (adaptado de [40]) .....	35
Figura 4.1 – Piso em alcatifa [44].....	39
Figura 4.2 – Esquema de uma laje flutuante [45] .....	40
Figura 4.3 – Esquema de pavimento flutuante (adaptado de [46]).....	41
Figura 4.4 – Exemplo de um teto suspenso [47] .....	42
Figura 7.1 – Planta da FEUP [69] .....	55
Figura 7.2 – Medidor digital <i>DLE 50 PROFESSIONAL</i> da <i>BOSCH</i> [Foto do autor].....	58
Figura 7.3 – (esquerda) Máquina de impactos <i>Brüel &amp; Kjaer</i> modelo 3204 [Foto do autor] .....	59
Figura 7.4 – (direita) Sonómetro <i>Brüel &amp; Kjaer</i> modelo 2260 [Foto do autor] .....	59
Figura 7.5 – Fonte sonora <i>Brüel &amp; Kjaer</i> modelo 4224 [Foto do autor] .....	59
Figura 7.6 – Disposição das diferentes posições da máquina de percussão na sala padrão .....	60
Figura 7.7 – Ajuste da curva dos níveis de pressão sonora normalizada (em bandas de 1/1 oitava) do Caso 1 à curva de referência .....	69
Figura 7.8 – Relação entre $T_0$ e volume a usar de forma a obter $L'_{nT,w}=L'_{n,w}$ .....	71
Figura 7.9 – Valores de $L'_{nT}$ obtidos para cada um dos casos medidos na FEUP .....	76
Figura 7.10 – Diferenças ( $\Delta$ ) entre os valores de $L'_{nT,w}$ e $L'_{n,w}$ .....	77
Figura 7.11 – Variação de $L'_{nT,w}$ com o volume do compartimento recetor.....	78
Figura 7.12 – Teto suspenso com colocação de painéis de lã mineral na caixa de ar [70] .....	79



## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Velocidade de propagação do som em diversos materiais [10] .....	10
Quadro 3.1 – Valores da curva CR [1] .....	25
Quadro 3.2 – Valores da curva C(f) para cada frequência [27] .....	27
Quadro 3.3 – Índices de isolamento sonoro a ruídos de percussão utilizados em diferentes países europeus em 2013 (adaptado de [39]) .....	34
Quadro 3.4 – Valores das correções $K_{TM}$ segundo EN 12354-2 [41] .....	36
Quadro 3.5 – Divisão dos índices de isolamento sonoro a ruídos de percussão em classes qualidade (adaptado de [42]) .....	37
Quadro 4.1 – Soluções construtivas ligeiras e seus índices de isolamento sonoro a ruídos de percussão (adaptado de [48]) .....	42
Quadro 6.1 – Valores limite de isolamento a ruídos de percussão segundo legislação Portuguesa (adaptado de [23], [24] e [60]) .....	50
Quadro 6.2 – Limite do tempo de reverberação segundo RRAE de 2008 [23] .....	50
Quadro 6.3 – Valores máximos de $L'_{nT,w}$ permitidos no Reino Unido (adaptado de [62]) .....	51
Quadro 6.4 – Valores mínimos de IIC a cumprir pelas escolas nos EUA (adaptado de [64]) .....	52
Quadro 6.5 – Valores máximos de $L'_{nT,w}$ admitidos nas escolas de França (adaptado de [44]) .....	52
Quadro 6.6 – Comparação dos limites regulamentares do isolamento sonoro a ruídos de percussão entre salas de aula em diferentes países .....	53
Quadro 7.1 – Descrição das principais características das salas de aula da FEUP ensaiadas [Fotos do autor] .....	56
Quadro 7.2 – Resumo dos casos a analisar nos ensaios efetuados .....	61
Quadro 7.3 – Valores medidos na sala B 017 (sala recetora) .....	61
Quadro 7.4 – Valores medidos e cálculo de $L'_{n,w}$ (com CR1) / $L'_{nT,w}$ (com CR2) da sala B 017 (CR-curva de referência, $\Delta$ -desvios e $L_b$ -Ruído de fundo) .....	62
Quadro 7.5 – Valores medidos na sala B 016 (sala recetora) .....	63
Quadro 7.6 – Valores medidos e cálculo de $L'_{n,w}$ (com CR1) / $L'_{nT,w}$ (com CR2) da sala B 016 (CR-curva de referência, $\Delta$ -desvios e $L_b$ -Ruído de fundo) .....	63
Quadro 7.7 – Valores medidos na sala B 109 (sala recetora) .....	64
Quadro 7.8 – Valores medidos e cálculo de $L'_{n,w}$ (com CR1) / $L'_{nT,w}$ (com CR2) da sala B 109 (CR-curva de referência, $\Delta$ -desvios e $L_b$ -Ruído de fundo) .....	65
Quadro 7.9 – Valores medidos na sala B 215 (sala recetora) .....	65
Quadro 7.10 – Valores medidos e cálculo de $L'_{n,w}$ (com CR1) / $L'_{nT,w}$ (com CR2) da sala B 215 (CR-curva de referência, $\Delta$ -desvios e $L_b$ -Ruído de fundo) .....	66
Quadro 7.11 – Valores medidos na sala B 216 (sala recetora) .....	67
Quadro 7.12 – Valores medidos e cálculo de $L'_{n,w}$ (com CR1) / $L'_{nT,w}$ (com CR2) da sala B 216 (CR-curva de referência, $\Delta$ -desvios e $L_b$ -Ruído de fundo) .....	67

Quadro 7.13 – Valores medidos e cálculo de $I_p$ dos Casos 1 ao Caso 3 (CR-curva de referência com a mesma numeração do caso em análise, $\Delta$ -desvios com a mesma numeração do caso em análise) ..	68
Quadro 7.14 – Valores medidos e cálculo de $I_p$ do Caso 4 e Caso 5 (CR-curva de referência com a mesma numeração do caso em análise, $\Delta$ -desvios com a mesma numeração do caso em análise) ..	69
Quadro 7.15 – Comparação de uso dos três regulamentos Portugueses em vigor ao longo dos anos .....	70
Quadro 7.16 – Valores calculados do índice FIIC para cada um dos casos analisados .....	71
Quadro 7.17 – Análise do cumprimento dos limites legislativos de isolamento sonoro a ruídos de percussão em salas de aula .....	72
Quadro 7.18 – Cálculo de $L'_{nT,w}$ Caso 1 (B218/B017) com uma gama alargada de frequências .....	73
Quadro 7.19 – Cálculo de $L'_{nT,w}$ Caso 2 (B111/B016) usando uma gama alargada de frequências ....	73
Quadro 7.20 – Cálculo de $L'_{nT,w}$ Caso 3 (B215/B109) com uma gama alargada de frequências .....	74
Quadro 7.21 – Cálculo de $L'_{nT,w}$ Caso 4 (B317/B215) usando uma gama alargada de frequências ....	74
Quadro 7.22 – Cálculo de $L'_{nT,w}$ Caso 5 (B319/B216) usando uma gama alargada de frequências ....	74
Quadro 7.23 – Comparação de $L'_{nT,w}$ usando 16 ou 21 bandas de frequências ( $\Delta = L'_{nT,w}$ (com 21 bandas de frequências) - $L'_{nT,w}$ (com 16 bandas de frequências)) .....	75

## SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

$\alpha$  – Coeficiente de absorção sonora

$A_0$  – Área de absorção sonora de referência ( $A_0 = 10 \text{ m}^2$ )

$c$  – Celeridade (m/s)

$C_I$  – Termo de adaptação espectral

CR – Curva de referência

dB – Decibel

$f$  – Frequência da onda sonora (Hz)

FIIC – Field impact insulation class

$I$  – Intensidade ( $\text{W/m}^2$ )

IIC – Impact insulation class

$I_p$  – Índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão normalizado (dB)

$L_i$  – Nível de pressão sonora no compartimento recetor (dB)

$L'_n$  – Nível de pressão sonora normalizado (dB)

$L'_{n,w}$  – Índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão normalizado (dB)

$L_{n,r,w}$  – Valor único do nível de pressão sonora de percussão normalizado de um pavimento de referência com um dado revestimento (dB)

$L'_{nT}$  – Nível de pressão sonora padronizado (dB)

$L'_{nT,w}$  – Índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão padronizado (dB)

$L_{pn}$  – Isolamento sonoro normalizado a ruídos de percussão (dB/oit.)

$n$  – Normalizado (para  $10 \text{ m}^2$  de absorção sonora do compartimento recetor);

$nT$  – Padronizado (para um  $T_0$  em geral igual a 0,5 s)

Pa – Unidade de medida Pascal

$p$  – Pressão sonora (Pa)

$P$  – Potência (W)

$R$  – Redução sonora dos elementos de construção (dB)

RMS – Valor da pressão sonora eficaz (Pa)

$T_0$  – Tempo de reverberação de referência (0,5 s)

$T$  – Tempo de reverberação (s)

$V$  – Volume ( $\text{m}^3$ )



# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS

A acústica está presente em quase todas as atividades do Ser Humano e mesmo sendo esquecida em muitas situações é um dos mais importantes conceitos que permite a vivência do Homem enquanto comunidade.

O desenvolvimento da sociedade fez com que o conforto das pessoas fosse cada vez mais uma preocupação aquando da construção de habitações, sendo que a acústica foi nos últimos anos merecedora de cada vez mais atenção para que se atingissem soluções para espaços com conforto otimizado.

O desenvolvimento de novas técnicas construtivas conseguidas com o desenvolvimento da ciência fez com que se alterassem os tipos de habitação das sociedades. Uma construção em altura com diversas famílias a partilhar um mesmo edifício substituiu as típicas habitações unifamiliares de pequena dimensão. Este facto fez com que o isolamento sonoro seja muito mais tido em conta nos últimos anos de forma a garantir o conforto e privacidade das pessoas.

A aprendizagem nas escolas tem na comunicação verbal o seu mais importante meio de transmissão de conhecimento entre professores e alunos, pelo que é do mais profundo interesse da sociedade que as salas de aula sejam capazes de proporcionar todas as condições de aprendizagem que permitam um saudável desenvolvimento do conhecimento.

O objetivo central deste trabalho é o estudo da transmissão de ruídos de percussão que se apresenta como um dos mais importantes e irritantes geradores de ruído numa sala de aula. São realizados ensaios *in situ* nas salas de aula da FEUP averiguando-se o seu respeito pelos diferentes regulamentos em vigor em Portugal, assim como a análise do cumprimento de alguns regulamentos internacionais.

### 1.2. ESTRUTURA DA TESE

Este trabalho divide-se em oito capítulos sendo eles:

- O Capítulo 1, onde se refere o enquadramento e objetivos da tese assim como se explica a estrutura da tese;
- O Capítulo 2, onde se faz uma breve descrição dos conceitos acústicos mais importantes para o entendimento da globalidade do trabalho;

- O Capítulo 3, onde se faz uma análise detalhada da transmissão de ruídos de percussão descrevendo-se a forma como atualmente se efetua a análise da transmissão de ruídos de percussão, assim como os principais conceitos que ainda hoje são tema de discussão e divergência por parte de especialistas em acústica;
- O Capítulo 4, onde se mencionam as principais soluções construtivas que permitem o aumento do isolamento sonoro a ruídos de percussão e consequente aumento do conforto acústico;
- O Capítulo 5, onde se apresentam as razões para a importância de condições acústicas em salas de aula;
- O Capítulo 6, onde se efetua uma análise de três regulamentos portugueses na área da acústica (RGR de 1987, RRAE de 2002 e RRAE de 2008), mais concretamente a forma como avaliam o isolamento sonoro de ruídos de percussão em salas de aula e quais os limites regulamentares. Os limites regulamentares de países estrangeiros são também analisados;
- O Capítulo 7, onde se procede ao estudo de caso em que se efetua a medição *in situ* da transmissão de ruídos de percussão nas salas de aula da FEUP e se efetua os cálculos necessários a uma análise aos resultados obtidos;
- O Capítulo 8, onde se sintetizam as principais conclusões deste trabalho assim como se efetuam considerações sobre possíveis desenvolvimentos futuros.

## 2

## CONCEITOS E DEFINIÇÕES

## 2.1. SOM E RUÍDO

Para um perfeito entendimento dos assuntos tratados ao longo deste trabalho importa ter conhecimento de algumas propriedades e características sonoras que constam neste texto, apresentando-se assim neste capítulo a descrição dos conceitos que se consideram essenciais.

Este texto fala sobre uma área importante na Engenharia Civil como é a acústica que pode ser definida como o ramo da Física onde se analisam e estudam as ondas sonoras. [1]

O som pode ser considerado quer um estímulo quer uma sensação. É um estímulo quando se propaga num meio elástico qualquer, no entanto pode também ser entendido como a sensação provocada no cérebro devida à captação de alterações de pressão no ar pelo sistema auditivo. [2]

No processo de audição são necessários três intervenientes, um emissor, um meio elástico de propagação e um recetor. O emissor é o interveniente responsável por produzir uma perturbação no meio, local onde a onda sonora se propaga através de sucessivas compressões e rarefações resultantes zonas de elevada e baixas pressões respetivamente (figura 2.1). No final a onda sonora é captada pelo recetor. É importante referir que sendo a onda sonora uma onda mecânica esta necessita de um meio material, com massa e elasticidade para se propagar, razão pela qual os sons não se propagam no vácuo. [1]

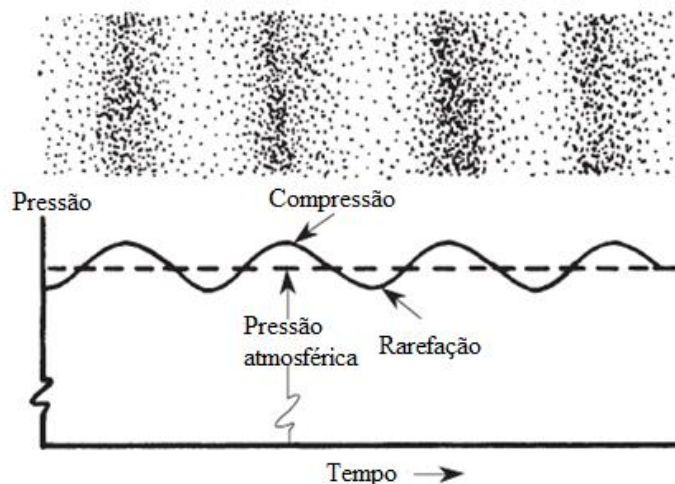


Figura 2.1 - Sucessivas compressões e rarefações de uma onda sonora (adaptado de [2])

O som e o ruído não possuem diferenças físicas na sua onda sonora. É através do recetor que se pode fazer a distinção entre ruído e som uma vez que o som pode ser definido como uma variação de pressão agradável ou com significado para o ouvinte (figura 2.2 esquerda) ao contrário do ruído que é uma variação de pressão desagradável ou sem significado (figura 2.2 direita), tratando-se assim de uma distinção muito subjetiva uma vez que é som para alguém pode ser ruído para outra pessoa que ouve exatamente o mesmo. [1]

Ao longo deste texto irá utilizar-se o conceito de ruído quando se fala de isolamento sonoro, ao contrário do que se efetua nas normas portuguesas de acústica em que se adota o conceito de som. Assim irá falar-se de isolamento sonoro a ruídos de percussão e não isolamento sonoro a sons de percussão, pois esta designação adotada parece mais apropriada aos objetivos do isolamento sonoro.



Figura 2.2 - Exemplos de situações classificadas como som (esquerda) ou ruído (direita) (adaptado de [3])

## 2.2. OUVIDO HUMANO

O ouvido humano (figura 2.3) é o órgão do corpo humano que permite o sentido da audição, podendo ser dividido anatomicamente em três partes distintas: o ouvido externo (constituído pelo pavilhão da orelha, o canal auditivo e o tímpano), o ouvido médio (formado pelos ossículos martelo, bigorna e estribo) e o ouvido interno (constituído pela cóclea). O ouvido é um órgão essencial para a existência de comunicação entre os seres humanos, sendo essencial o conhecimento do seu funcionamento. [4]

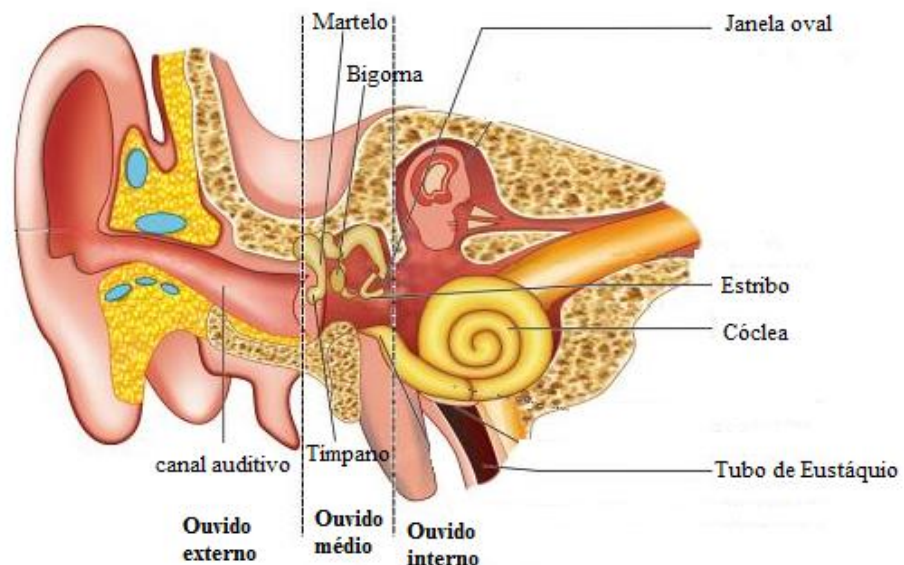


Figura 2.3 - Divisão do ouvido humano (ouvido externo, médio e interno) e seus principais constituintes (adaptado de [4])



No ouvido externo o pavilhão da orelha capta as ondas sonoras que são encaminhadas, através do canal auditivo, para o tímpano que ao receber a onda sonora entra em vibração.

No ouvido médio os ossículos (figura 2.4) servem de amplificador da onda sonora aumentando a intensidade das vibrações. O estribo (ossículo mais interior) encontra-se ligado à janela oval através da qual são transmitidas as vibrações ao ouvido interno.

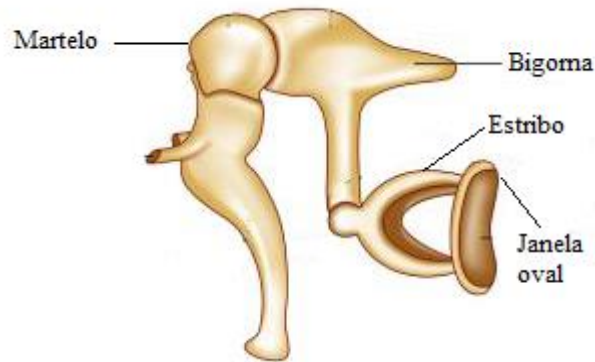


Figura 2.4 - Representação dos ossículos (martelo, bigorna e estribo) e sua ligação à janela oval (adaptado de [4])

No ouvido interno (figura 2.5) o movimento da janela oval provoca a vibração da perilinfa (líquido que se encontra no interior da cóclea) que por sua vez provoca o movimento dos cílios na membrana basilar. A inclinação dos cílios provoca a criação de impulsos elétricos que são transmitidos ao cérebro.

Os cílios agem de diferente forma conforme a frequência do som captado, se o som for de frequência baixa os cílios reagem em toda a extensão da membrana basilar, pelo contrário se o som for de elevada frequência apenas reagem os cílios da zona inicial da membrana basilar ou seja os mais próximos da janela oval. [1]

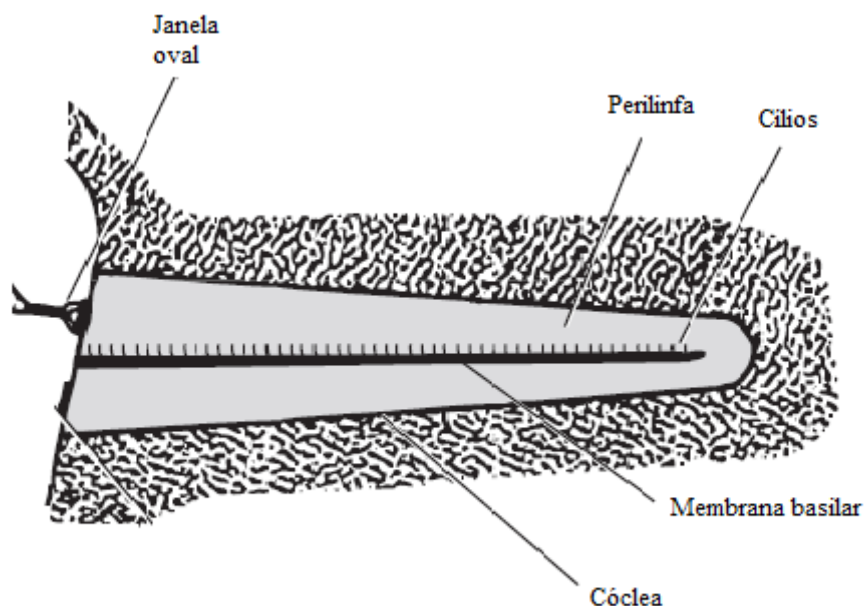


Figura 2.5 - Representação esquemática do ouvido interno humano e dos seus constituintes (adaptado de [4])

## 2.3. PROPRIEDADES BÁSICAS DO SOM

### 2.3.1. PRESSÃO SONORA

A pressão sonora perceptível pelo ouvido consiste na variação de pressão, em relação à pressão normal que aí se verificava, que uma onda sonora provoca num determinado meio. No ar a pressão de referência é a pressão atmosférica que tem um valor aproximado de 101400 Pa ( $\approx 10^5$  Pa). É então a variação de pressão (figura 2.6), muito pequena em relação ao valor da pressão atmosférica, que os seres humanos são capazes de captar e que lhes permite ter o sentido da audição. A unidade de medida da pressão sonora é o pascal em homenagem ao conhecido físico. [3]

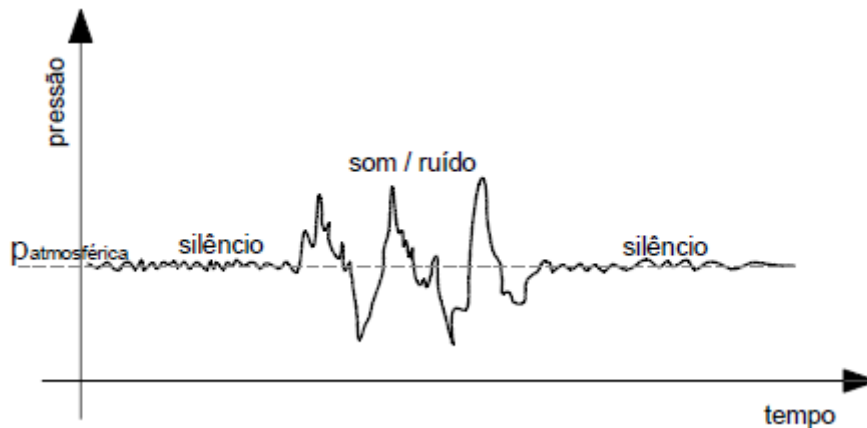


Figura 2.6 – Variação da pressão com o tempo [5]

O ser humano é capaz de captar variações de pressão desde os  $10^{-5}$  Pa até aos 100 Pa, valores que identificam os chamados limiar da audição e limiar da dor, respetivamente. De salientar que a partir do limiar da dor a sensação auditiva deixa de acontecer sentindo o ser humano apenas dor. [6]

Como o ouvido não responde de forma linear aos estímulos mas sim de forma quase logarítmica a caracterização da pressão do som é feita normalmente através do nível de pressão sonora que tem como unidade o decibel (dB). Esta escala (figura 2.7) permite uma obtenção de valores mais facilmente comparáveis. O nível de pressão sonora pode ser obtido através da seguinte fórmula:

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad (2.1)$$

Em que,

- $L_p$  – nível de pressão sonora (dB);
- $p$  – pressão sonora (Pa);
- $p_0$  – pressão sonora de referência ( $2 \times 10^{-5}$  Pa).

De notar que os valores dos níveis de pressão sonora podem ser negativos caso a pressão sonora medida seja inferior à de referência ou ter um valor nulo se a pressão medida for igual à de referência fazendo com que um nível de pressão sonora de 0 dB não signifique a ausência de variação sonora como à primeira vista se poderia pensar.

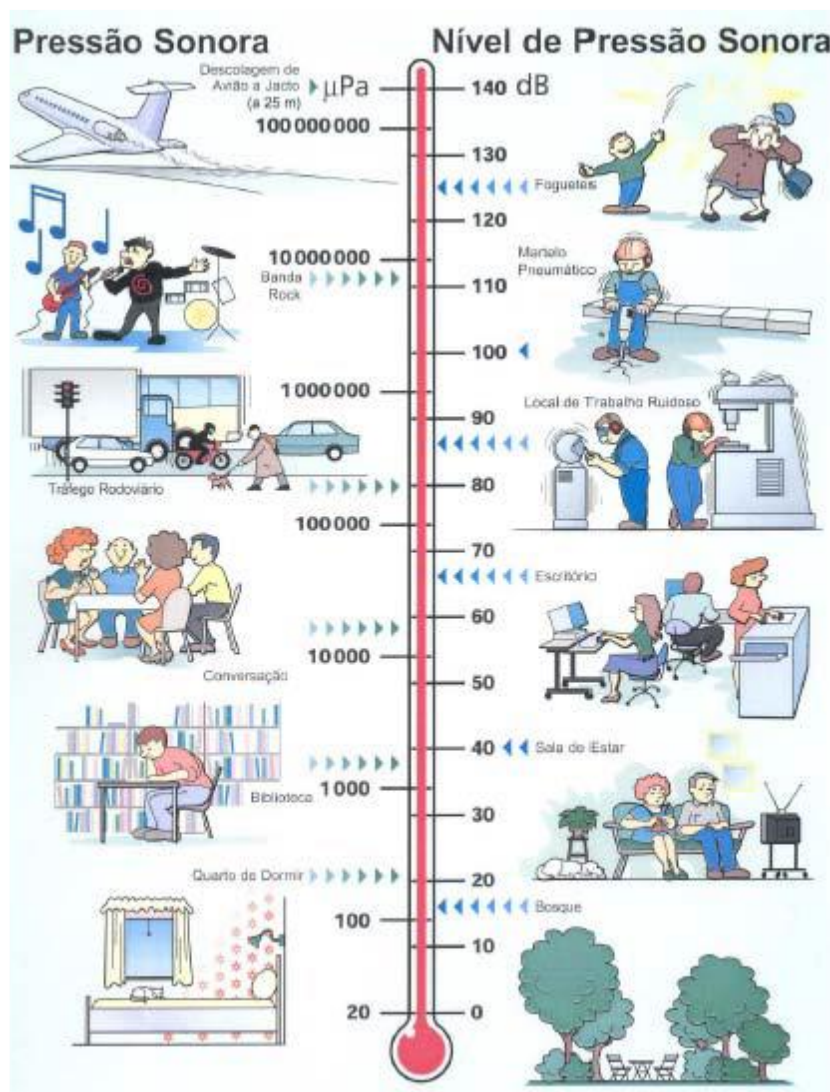


Figura 2.7 - Comparação da pressão com o nível de pressão sonora de algumas atividades (adaptado de [6])

Outro aspeto importante deve-se a facto de a soma de níveis não ser algébrica. Neste exemplo a soma de dois sons de 60 dB não dá origem a um nível de 120 dB mas sim a um nível sonoro de 63 dB (figura 2.8).

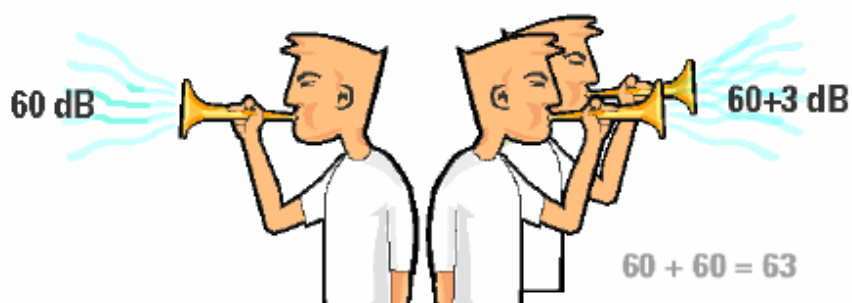


Figura 2.8 - Soma de níveis de pressão sonora (adaptado de [7])

A soma de n níveis de pode ser feita através de:

$$L_{soma} = 10\log(\sum_{i=1}^n 10^{L_i/10}) \quad (2.2)$$

Aparelhos eletrónicos como os sonómetros determinam a pressão eficaz ou RMS (*root mean square*) e não a pressão máxima, pois a pressão é uma variável com variação temporal significativa (figura 2.9).

A pressão eficaz pode ser calculada através de:

$$p_{ef}^2 = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt \quad (2.3)$$

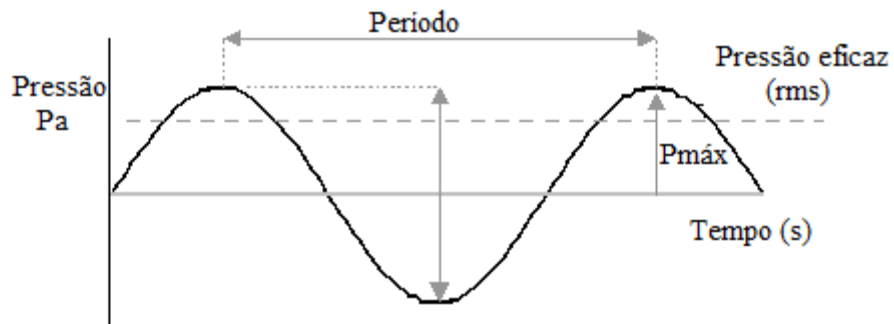


Figura 2.9 - Comparação de pressão eficaz (RMS) com pressão máxima (adaptado de [8])

### 2.3.2. INTENSIDADE E POTÊNCIA SONORA

A intensidade e potência sonora (figura 2.10) são duas grandezas indispensáveis no estudo de qualquer som, sendo que a intensidade sonora ( $I$ ) representa numa dada direção a quantidade média de energia que atravessa por segundo uma área de  $1 \text{ m}^2$  normal a essa direção e quantifica-se em  $\text{W/m}^2$ . Trata-se de uma grandeza vetorial e o seu valor é tanto maior quanto maior for a variação de pressão e diminui à medida que o som se afasta da fonte. [7]

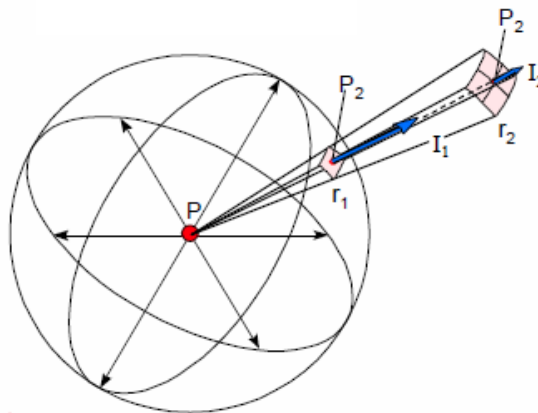


Figura 2.10 - Relação entre potência ( $P$ ), intensidade ( $I$ ) e pressão ( $P_2$ ) (adaptado de [9])

A potência sonora (W) por sua vez designa uma característica da fonte que cria o som e define-se como sendo a energia total que num segundo atravessa uma esfera fictícia de raio qualquer centrada na fonte e quantifica-se em watt. [9]

Estas grandezas estão relacionadas através de:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{p^2}{\rho c} \quad (2.4)$$

Sendo,

- I – intensidade sonora (W/m<sup>2</sup>);
- W – potência sonora (W);
- r – distância (m);
- p – pressão sonora (Pa);
- ρ – massa volúmica (ar ≈ 1,2 kg/m<sup>3</sup>);
- c – celeridade (m/s).

Estas propriedades também podem ser medidas em dB, usando para isso um valor de referência. Desta forma o nível de intensidade sonora pode ser calculado através de:

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (2.5)$$

E o nível de potência sonora através de:

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad (2.6)$$

Sendo,

- L<sub>I</sub> – nível de intensidade sonora (dB);
- L<sub>W</sub> – nível de potência sonora (dB);
- I – intensidade sonora (W/m<sup>2</sup>);
- W – potência sonora (W);
- I<sub>0</sub> – intensidade de referência (10<sup>-12</sup> W/m<sup>2</sup>);
- W<sub>0</sub> – potência de referência (10<sup>-12</sup> W).

### 2.3.3. FREQUÊNCIA, COMPRIMENTO DE ONDA E CELERIDADE

A frequência (f) é uma grandeza muito importante para a correta caracterização de um determinado som. Esta propriedade representa a taxa de ocorrência de flutuações completas de pressão por segundo e mede-se em hertz (Hz). Representa assim o número de ciclos completos por segundo, sendo o inverso do período que representa a duração de um ciclo e mede-se em segundos.

Um ser humano com audição normal e jovem ouve aproximadamente entre os 20 e os 20000 Hz. Sendo que este intervalo vai sendo cada vez mais reduzido à medida que o ser humano vai envelhecendo. Os sons de frequência inferior a 20 Hz são chamados de infra-sons e os sons com frequência superior a 20000 Hz designam-se de ultra-sons (figura 2.11). [6]

É esta propriedade que permite classificar os sons em termos de altura como graves, ou agudos. Os sons graves têm baixas frequências que variam entre 20 e 355 Hz, os sons agudos têm elevadas frequências entre 1410 e 20000 Hz. Os sons entre 355 e 1410 Hz são chamados de frequência média.

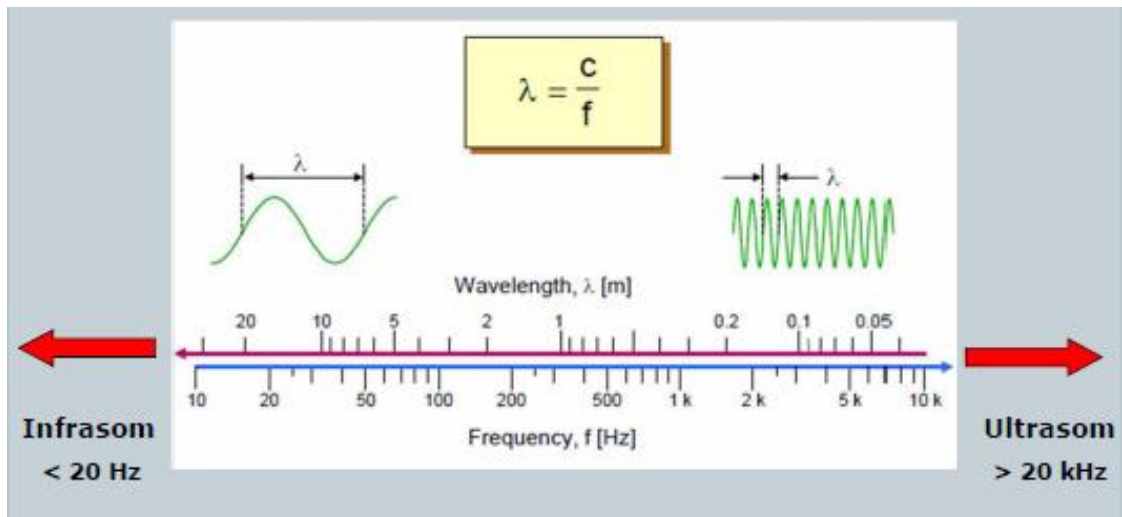


Figura 2.11 – Classificação dos sons quanto à sua frequência (sons audíveis, infra-sons e ultra-sons) (adaptado de [6])

A frequência permite também classificar os sons como puros quando possuem apenas uma única frequência e sons complexos quando um som é composto pela sobreposição de dois ou mais sons puros e consequentemente com mais que uma frequência.

O comprimento de onda ( $\lambda$ ) representa a distância entre dois pontos consecutivos e idênticos da onda sonora.

Convém também fazer menção à celeridade ( $c$ ) que representa a velocidade de propagação de uma onda sonora, esta propriedade varia em grandes proporções de acordo com o material em que a onda se propaga (quadro 2.1).

Quadro 2.1 - Velocidade de propagação do som em diversos materiais [10].

Meio de propagação	Velocidade (m/s)	Meio de propagação	Velocidade (m/s)
<b>Dióxido de carbono (0 °C)</b>	258	<b>Água (20 °C)</b>	1480
<b>Oxigénio</b>	317	<b>Borracha</b>	1500
<b>Ar (20 °C)</b>	343	<b>Água do mar</b>	1522
<b>Hélio (20 °C)</b>	927	<b>Latão</b>	3500
<b>Álcool etílico</b>	1180	<b>Cobre</b>	3900
<b>Chumbo</b>	1200	<b>Alumínio</b>	4420
<b>Hidrogénio (0 °C)</b>	1270	<b>Betão</b>	5000
<b>Mercúrio</b>	1450	<b>Aço</b>	6000

No entanto analisando apenas a celeridade no ar esta varia de acordo com a temperatura existente e pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$c = 20,045\sqrt{T} \quad (2.7)$$

Em que,

- $c$  – celeridade em m/s;
- $T$  – temperatura em kelvin.

Para uma mais fácil e correta análise de um ruído é usual agrupar as frequências em bandas correspondentes a intervalos normalizados (figura 2.12). Estes intervalos correspondem a um agrupamento de frequências entre um limite inferior ( $f_1$ ) e um limite superior ( $f_2$ ), sendo que o valor médio da banda ( $f_0$ ) denominado de frequência central pode ser obtido por:

$$f_0 = \sqrt{f_1 f_2} \quad (2.8)$$

A largura da banda é a diferença entre o limite superior e inferior dessa banda. As bandas utilizadas em acústica de edifícios têm larguras de 1/1 oitava e 1/3 oitava. Esta designação deve-se a:

- Nas bandas de 1/1 oitava  $\frac{f_2}{f_1} = 2^1$
- Nas bandas de 1/3 de oitava  $\frac{f_2}{f_1} = 2^{1/3}$

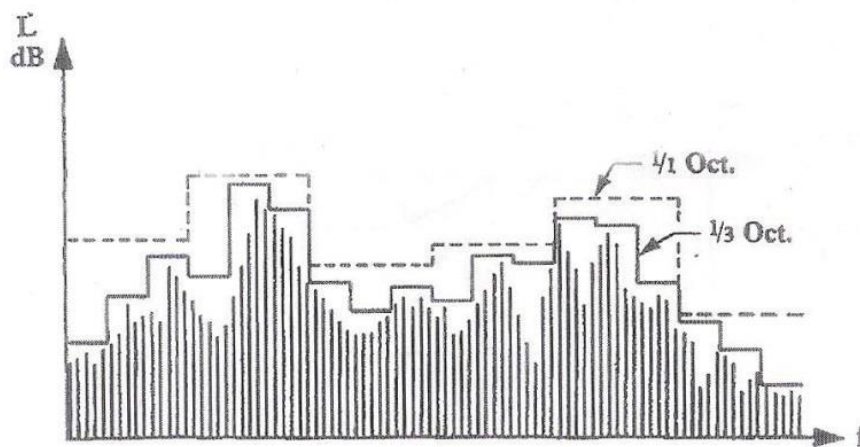


Figura 2.12 - Nível de pressão sonora para bandas de 1/1 oitava e 1/3 oitava [1]

Os valores das frequências médias de cada uma das bandas anteriores são os seguintes:

- 1/1 oitava: 16 Hz, 31 Hz, 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz e 16 kHz;
- 1/3 oitava: 20 Hz, 25 Hz, 31 Hz, 40 Hz, 50 Hz, 63 Hz, 80 Hz, 100 Hz, 125 Hz, 160 Hz, 200 Hz, 250 Hz, 315 Hz, 400 Hz, 500 Hz, 630 Hz, 800 Hz, 1 kHz, 1250 Hz, 1600 Hz, 2 kHz, 2500 Hz, 3150 Hz, 4 kHz, 5 kHz, 6300 Hz, 8 kHz, 10 kHz, 12500 Hz, 16 kHz, e 20 kHz.



#### 2.3.4. DURAÇÃO DO SOM

A duração é bastante importante especialmente quando se fala em ruído, podendo-se classificar o som entre durações quase instantânea (figura 2.13 à direita) como disparos ou duração quase infinita como quedas de água (figura 2.13 à esquerda). Os primeiros têm uma variação de pressão bastante intensa e concentrada no tempo enquanto os segundos tendem a prolongar-se no tempo com pequenas variações de pressão. [5]

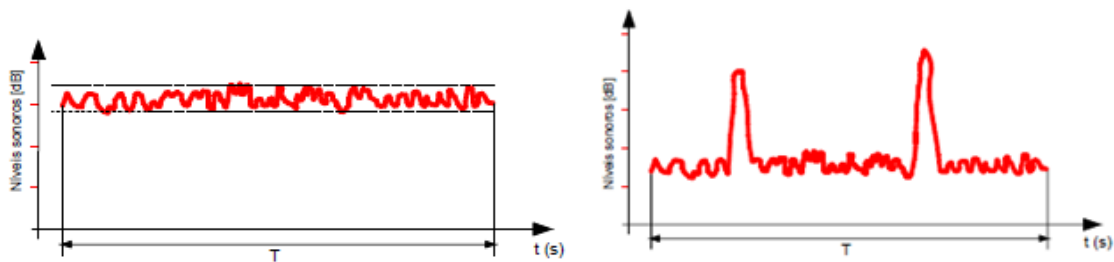


Figura 2.13 - Diferenças entre as variações de um ruído contínuo (à esquerda) e intermitente (direita) [5]

Assim de forma a comparar ruídos muito diferentes utilizam-se parâmetros de medida de ruído sendo os mais usados os níveis de pressão sonora estatísticos ( $L_N$ ) e o nível de pressão sonora contínuo equivalente ( $L_{eq}$ ).

O valor de  $L_{eq}$  é calculado através de:

$$L_{eq} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n (t_i \times 10^{\frac{L_i}{10}}) \quad (2.9)$$

O valor de  $L_N$  representa o nível de pressão sonora que é excedido em N% do intervalo de tempo considerado na medição.

#### 2.3.5. CURVAS DE PONDERAÇÃO

O ouvido humano é capaz de captar uma gama de frequências limitada, sendo que dentro dessa gama do audível existe uma sensibilidade variável para as várias frequências. O ouvido é particularmente sensível para frequências entre os 2300 e os 2800 Hz, e muito pouco sensível para as frequências que se encontram acima e abaixo destes limites.

Os aparelhos de medição do som, como os microfones, não possuem esta limitação não sendo por isso possível comparar diretamente os sons que os humanos ouvem com o som que o microfone capta. De forma a ultrapassar este problema surgiram os filtros sonoros que adaptam o nível de pressão sonora captada pelos equipamentos à sensibilidade do ouvido humano. Os filtros (figura 2.14) são representados por curvas de ponderação que indicam a correção a fazer para cada banda de frequência.

Atualmente a curva de ponderação mais usada é a do tipo A e que foi inicialmente pensada para adaptar ao ouvido humano os sons de fraca intensidade. O nível sonoro em dB(A) que tão usualmente é utilizado representa o nível sonoro captado pelo equipamento filtrado pela curva de ponderação A. [1]



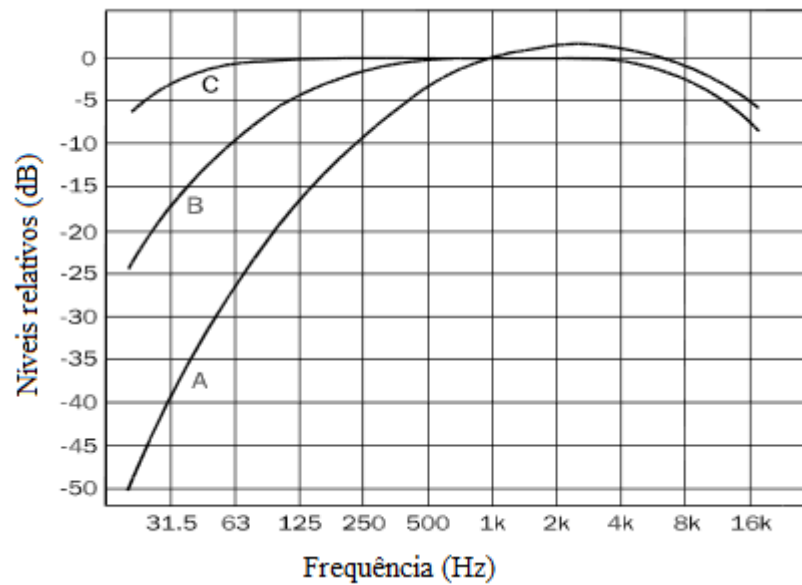


Figura 2.14 - Curvas de ponderação (filtros) (adaptado de [2])

## 2.4. ABSORÇÃO, REFLEXÃO SONORA E TRANSMISSÃO SONORA

Estes três conceitos de absorção, transmissão e reflexão sonora (figura 2.15) estão intimamente ligados uma vez que quando o som encontra um obstáculo, dependendo das suas características, o som pode ser absorvido pelo obstáculo, sendo a energia sonora transformada noutra forma de energia, pode ser refletido fazendo com que a onda sonora inverta o seu sentido, ou pode ser transmitido fazendo com que o som transponha o obstáculo. [2]

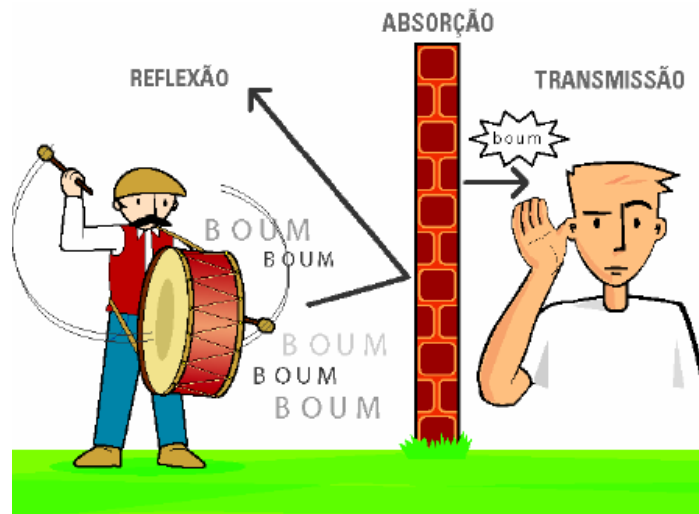


Figura 2.15 - Diferentes caminhos que o som pode tomar ao encontrar um obstáculo [6]

Falando da absorção sonora convém lembrar a lei de conservação de energia que diz que a energia não pode ser criada nem destruída apenas transformada e é isso mesmo que acontece na absorção sonora. A

energia sonora que incide sobre um material é transformada noutra modalidade de energia, normalmente térmica.

Esta propriedade dos materiais é representada pelo coeficiente de absorção sonora e designa-se pela letra  $\alpha$ . Este coeficiente representa a relação existente entre a energia sonora que é absorvida e a energia que incide nesse determinado material.

$$\alpha = \frac{E \text{ absorvida}}{E \text{ incidente}} \quad (2.9)$$

Trata-se de um coeficiente adimensional que varia entre 0 e 1, sendo que um material muito absorvente apresenta valores próximos da unidade e materiais pouco absorventes apresentam valores próximos de zero. Convém referir que por vezes ensaios de determinação deste coeficiente geram resultados ligeiramente superiores a 1, valores logicamente irrealistas mas que se devem ao método utilizado e que a seguir se explicará. [1]

O valor do coeficiente de absorção sonora ( $\alpha$ ) pode ser obtido através de três métodos: o método de ondas estacionárias, o método da câmara reverberante e a medição *in situ*.

O método de ondas estacionárias consiste em usar um longo tubo metálico (figura 2.16) de 10 cm de diâmetro e em que numa extremidade se coloca a amostra a testar e na outra existe um pequeno altifalante que ligado cria ondas estacionárias devidas à interação da onda incidente com a onda refletida pela amostra. Este processo é descrito na norma ISO 10534-1 [11]. A forma desta onda estacionária permite a determinação do coeficiente de absorção sonora do material. [1]

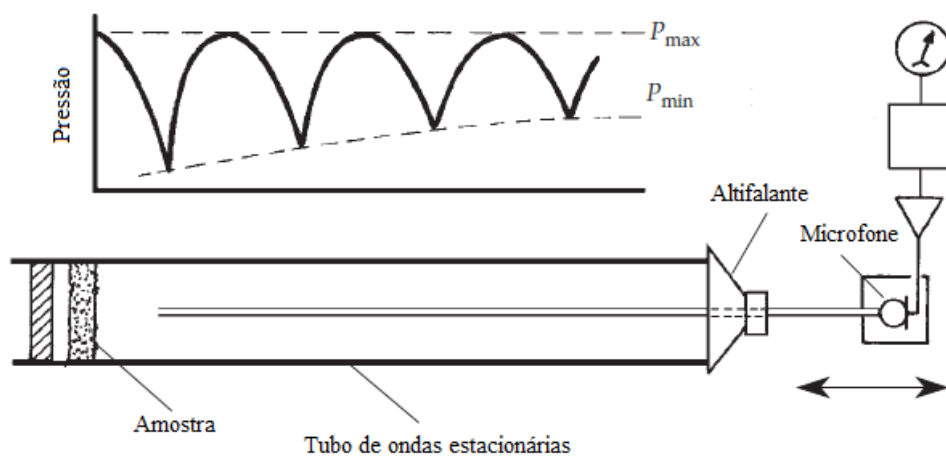


Figura 2.16 - Tubo de ondas estacionárias para determinação de  $\alpha$  (adaptado de [2])

O método da câmara reverberante descrito na NP EN ISO 354 [12] permite testar amostras de muito consideráveis dimensões que podem variar entre 10 e 12 m<sup>2</sup>. A câmara reverberante é uma grande sala com todas as superfícies revestidas de material refletor (com  $\alpha$  muito pequeno) e elevado tempo de reverberação. Coloca-se a amostra do material no piso da câmara e mede-se o tempo de reverberação. Usando a fórmula de Sabine é possível obter o  $\alpha$  do material para cada banda de frequência por comparação dos tempos de reverberação da câmara vazia e com a amostra.

Este método que pode fazer surgir valores superiores a 1,0 devido à possibilidade de existir difração do som nos bordos da amostra que a faz parecer com uma área absorvente maior do que a realidade. [1]

O valor do coeficiente de absorção sonora de um dado material varia de acordo com o ângulo de incidência e com a frequência do som incidente. É devido a esta razão que os materiais absorventes sonoros se podem dividir em três categorias (figura 2.17) de acordo com as frequências em que manifestam uma maior absorção.

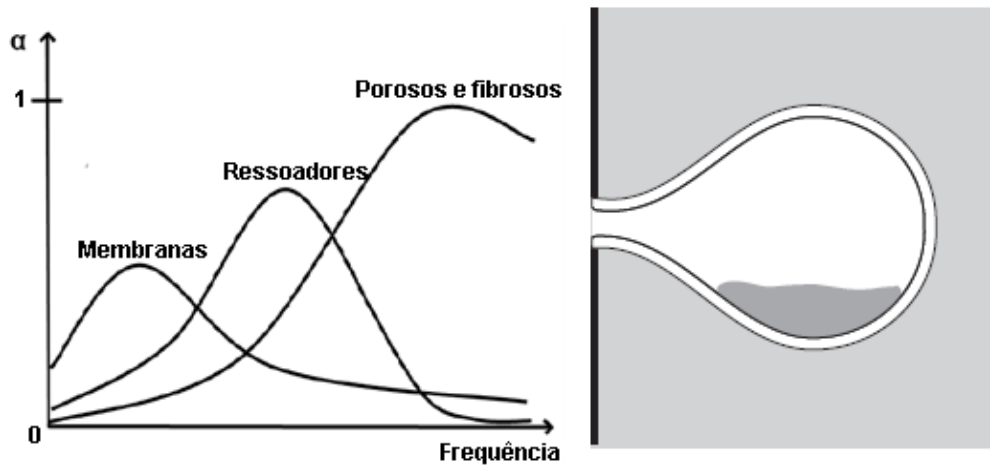


Figura 2.17 - Comparação do poder de absorção dos três tipos de materiais em função da frequência [1]

Figura 2.18 - Ressonador [2]

A primeira categoria engloba os materiais porosos ou fibrosos (figura 2.19) que absorvem sobretudo em altas frequências. O seu mecanismo de absorção baseia-se na existência de poros e interstícios no interior destes materiais. As ondas sonoras ao incidirem sobre estes materiais transmitem parte da sua energia ao movimento das fibras que resistem por fricção. A energia sonora transforma-se em calor. Dentro desta categoria encontram-se materiais como tecidos e alcatifas ou aglomerados de cortiça.

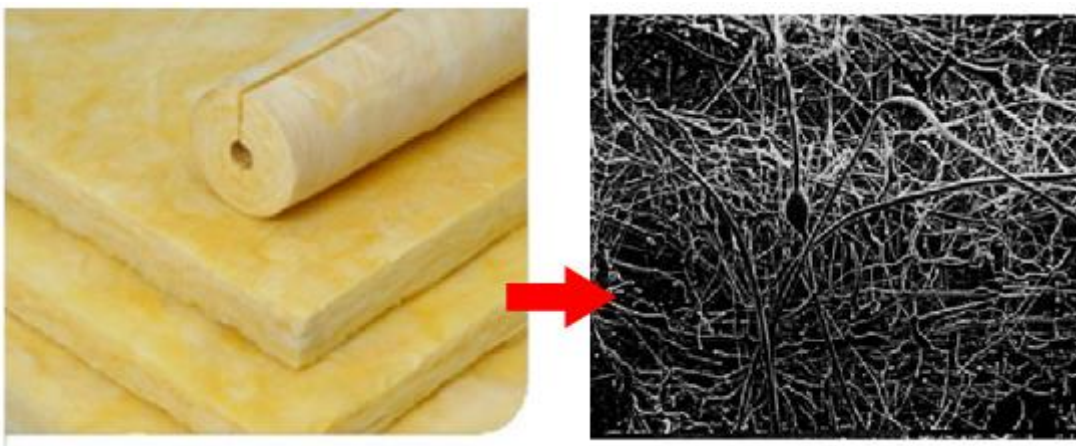


Figura 2.19 - Materiais fibrosos e porosos (adaptado de [13])

Os ressoadores (figura 2.18) têm uma ação mais eficaz para as médias frequências e constituem a segunda categoria, são constituídos por uma cavidade de ar confinado ligado ao exterior através de uma

abertura estreita denominada gargalo. O ar no gargalo é colocado em vibração entrando e saindo deste. Existem ressoadores isolados e agrupados. [1]

As membranas (figura 2.20) absorvem maioritariamente nas baixas frequências. Estes sistemas absorvem as ondas sonoras que nele incidem pela vibração de toda a sua estrutura e através da perda de calor por fricção nas suas fibras quando o material flete. As membranas absorvem energia na frequência do som que é igual à frequência natural de vibração do sistema.

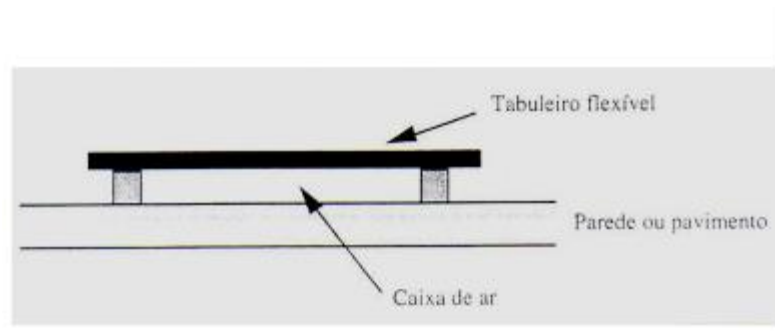


Fig. 2.20 - Exemplo de uma membrana [13]

Assim os materiais apresentam diferentes valores de absorção dependendo da frequência. Por essa razão existem índices capazes de descrever os materiais. Os mais usados são o NRC (*noise reduction coefficient*) e o  $\alpha_w$ . O primeiro é muito usado nos EUA e representa a média aritmética dos valores do coeficiente de absorção sonora nas bandas de oitava dos 250 aos 2000 Hz. O segundo mais utilizado na Europa é descrito na norma EN ISO 11654 [14] e é obtido por ajuste a uma curva de referência usando as bandas de oitava dos 250 aos 4000 Hz.

Quando um som é produzido em campo aberto a sua propagação dá-se em todas as direções afastando-se continuamente do emissor. O mesmo não acontece quando dentro de um espaço fechado em que o som produzido na fonte chega ao emissor não apenas pelo caminho direto (sem reflexões), como também através de percursos que envolvem uma ou mais reflexões. As reflexões ajudam a definir as características acústicas de um espaço fechado. [2]

As ondas refletidas podem apresentar diferentes ângulos de acordo com o tipo de forma da superfície refletora. As superfícies que refletem em todas as direções chamam-se superfícies difusas.

Como o som recebido por um recetor pode ter percorrido diferentes caminhos isso quer dizer que muito provavelmente o som percorreu diferentes distâncias o que resulta num atraso temporal em relação ao som direto. Se este atraso for suficientemente grande de forma a que a onda sonora seja claramente identificada pelo ouvido ocorre o eco. Outro fenómeno que pode ocorrer é a existência de modos próprios que se dão quando em certas frequências os caminhos que as ondas sonoras percorrem se repetem e criam modos próprios de vibração fazendo com que as ondas sonoras cheguem em fase e provoquem pequenas amplificações ou atenuações face à média. [1]

## 2.5. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

Quando se cessa a produção de um determinado som ou ruído num compartimento existe um determinado espaço de tempo em que esse som vai diminuindo de intensidade até ao momento em que este deixa de ser audível. Esse espaço de tempo é o que se chama de tempo de reverberação. Isto deve-se ao facto de ao ouvinte chegarem ondas sonoras de origem direta e refletidas. À medida que as ondas refletidas se tornam cada vez mais fracas devido à absorção sonora nas superfícies o som vai-se extinguindo. O tempo de reverberação é por definição o tempo, em segundos, que um som demora a decair 60 dB desde que a fonte sonora para de emitir. No entanto devido à existência de ruído de fundo normalmente não é possível obter um decaimento de 60 dB, pelo que se tenta obter um decaimento mais pequeno de 30 dB por exemplo e extrapola-se o decaimento através do declive da reta (figura 2.21). [2]

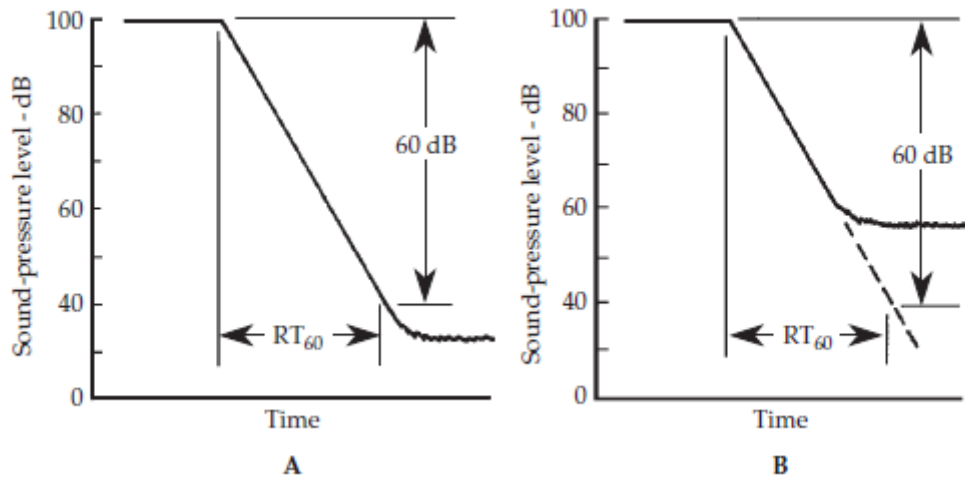


Figura 2.21 - Tempo de reverberação teórico (esquerda) e extrapolado (direita) [1]

A previsão do tempo de reverberação de um compartimento pode ser feita utilizando métodos analíticos. A principal ferramenta para a determinação do tempo de reverberação é a fórmula de Sabine que foi publicada em 1900.

$$T = \frac{0,16V}{A} \quad (2.10)$$

Em que,

- T - tempo de reverberação (s);
- V - volume do compartimento (m<sup>3</sup>);
- A - absorção sonora equivalente (m<sup>2</sup>).

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i \quad (2.11)$$

Com,

- $\alpha$  - coeficiente de absorção sonora do material (sem unidades);
- S - superfície real do material (m<sup>2</sup>).

A fórmula de Sabine apresenta resultados muito próximos da realidade para locais sonoros difusos e com  $\alpha$  médio inferior a 0,20.

Ao longo dos anos outras personalidades foram desenvolvendo outras fórmulas para a determinação do tempo de reverberação. Embora nenhuma outra expressão tenha tido o sucesso e aceitação da fórmula de Sabine existem algumas que merecem ser referenciadas.

A fórmula de Eyring, apresentada em 1930, é adequada para situações em que todas as superfícies da envolvente têm coeficiente de absorção semelhantes e tem a seguinte expressão:

$$T = \frac{0,16V}{-S \cdot \ln(1-\bar{\alpha})} \quad (2.12)$$

Em que,

- $\bar{\alpha} = \sum \alpha_i \cdot S_i / \sum S_i$  representa a média pesada pelas superfícies  $S_i$ , dos coeficientes de absorção sonora  $\alpha_i$  das superfícies envolventes, com  $S = \sum S_i$

Outra fórmula bastante conhecida é a fórmula de Millington-Sette e que é mais adequada a situações em que existem significativas diferenças entre os coeficientes de absorção das superfícies envolventes do local. Esta fórmula tem a seguinte expressão:

$$T = \frac{0,16 \cdot V}{-\sum_{i=1}^N S_i \ln(1-\alpha_i)} \quad (2.13)$$

Em que:

- $S_i$  representa a superfície do material ( $m^2$ );
- $\alpha_i$  representa o coeficiente de absorção sonora do material.

O tempo de reverberação de uma sala pode ter um efeito favorável ou desfavorável de acordo com o uso dado a essa mesma sala. Este parâmetro aumenta o nível sonoro da sala e mascara os sons diretos que são secundarizados pelos sons refletidos.

## 2.6. ISOLAMENTO SONORO

### 2.6.1. CONCEITO

O isolamento sonoro nos edifícios é muito importante e cada vez mais é utilizado como uma medida de aumentar o nível de conforto das construções. O aspeto mais importante é o isolamento sonoro da envolvente exterior dos edifícios que impede que o ruído exterior possa entrar dentro dos mesmos. No entanto um edifício, conforme o seu tipo de utilização que lhe é dado, deve também cumprir requisitos de isolamento dos ruídos produzidos no próprio edifício.

O isolamento sonoro pode ser dividido em duas categorias: o isolamento sonoro a ruídos aéreos em que a transmissão é feita através da vibração do ar e o isolamento sonoro a ruídos de percussão em que existe uma solicitação mecânica direta sobre os elementos de construção.

### 2.6.2. ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS DE CONDUÇÃO AÉREA

O ruído de condução aérea é então aquele que se propaga apenas pela vibração do ar, o que proporciona que quando a onda sonora encontra uma superfície, uma parte da energia da onda será absorvida ou refletida pela superfície. No entanto existe uma certa quantidade de energia que é capaz de ultrapassar a superfície que divide dois espaços e ser transmitida ao segundo espaço. Quanto maior for a diferença entre a energia que incide e a energia que ultrapassa a superfície melhor será o isolamento a ruídos de condução aérea desta superfície.

O isolamento a ruídos de condução aérea pode ser aumentado de duas formas distintas: a primeira consiste em aumentar a massa do material que divide os dois espaços considerados e a segunda passa pela duplicação física do material separador. [1]

Importa referir que a transmissão de ruídos aéreos pode realizar-se através de dois caminhos, o primeiro pela chamada via direta em que o ruído atravessa diretamente e apenas o material divisor e um segundo caminho a que se chama transmissão marginal em que o ruído pode também passar pelos elementos que se ligam ao elemento divisor (no contorno).

O parâmetro que permite caraterizar este isolamento sonoro designa-se de redução sonora (R) e mede-se em dB.

$$R = 10\log(1/\tau) \quad (2.14)$$

### 2.6.3. ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS DE PERCUSSÃO

Os ruídos de percussão são aqueles em que existe uma solicitação mecânica direta sobre um elemento construtivo que por esse efeito entra em vibração e a transmite aos elementos construtivos a que se encontra ligado fazendo com que chegue ruído a outras divisões do edifício. Tal como a transmissão de ruídos de condução aérea a transferência do ruído efetua-se quer por transmissão direta quer por transmissão marginal. [1]

A quantificação da transferência dos ruídos de percussão pode ser feita por medição *in situ* (este tipo de quantificação será abordada na caraterização do caso de estudo), por via experimental, sem a contabilização das transmissões marginais neste caso, ou através de modelos de previsão.

Nas medições *in situ* a transmissão de ruído de percussão pode ser calculado por:

$$L'_{nT} = L_i - 10(T/T_0) \quad (2.15)$$

Em que,

- $L'_{nT}$  – nível de pressão sonora padronizado;
- $L_i$  – nível de pressão sonora médio medido no compartimento recetor;
- $10\log(T/T_0)$  – correção devida às condições de reverberação do compartimento recetor;
- $T$  – tempo de reverberação do compartimento recetor (s);
- $T_0$  – tempo de reverberação de referência (em geral  $T_0 = 0,5$  s).

A transmissão dos ruídos de percussão pode ser diminuída aplicando revestimentos resilientes nas superfícies dos elementos separadores (no local onde é aplicada a solicitação mecânica) ou tornando os elementos divisores descontínuos fazendo-se com que seja cortada a transmissão da energia.

## 2.7. INTELIGIBILIDADE DA PALAVRA

A comunicação oral foi um dos mais importantes avanços da evolução do ser humano e que lhe permitiu uma infinidade de possibilidades que até aí nenhum outro ser vivo possuía.

Atualmente a perceção da palavra é um importante requisito a ter em conta quando se projeta um espaço destinado a comunicação verbal entre as pessoas presentes nesse espaço como é o caso de uma sala de aula em que é da mais elementar importância que as palavras proferidas pelo professor sejam claramente escutadas e percebidas pelos alunos. [1]

A inteligibilidade da palavra pode ser definida como o grau de entendimento que as palavras emitidas por um emissor são captadas por um recetor pode ser afetada por algumas características de uma sala como o ruído de fundo ou o tempo de reverberação da sala.

De forma a caracterizar esta propriedade de um espaço foram criados uma serie de parâmetros capazes de descrever a perceção da palavra numa sala. Estes dividem-se em dois grandes grupos, os parâmetros objetivos e os parâmetros subjetivos. [1]

De entre os subjetivos salientam-se:

- PB (*Phonetically Balanced words*);
- MRT (*Modified Rhyming Test*).

Dos parâmetros objetivos podem-se destacar:

- AI (índice de articulação);
- SIL (nível de interferência na conversação);
- AC (*articulation class*);
- STI e RASTI (*rapid speech transmission index*).



# 3

## RUÍDOS DE PERCUSSÃO

### 3.1. CAUSAS DE RUÍDOS DE PERCUSSÃO EM ESCOLAS

As escolas são estabelecimentos constituídos por espaços com diferentes utentes e funções, pelo que para além das salas de aula existem compartimentos ocupados por refeitórios, corredores com constante movimentação de estudantes, salas de professores ou bares. Ora a movimentação e o ruído produzidos em cada um destes espaços é muito diferente e é importante que as salas de aula sejam espaços suficientemente isolados dos ruídos produzidos em salas vizinhas, mas também dos produzidos em todos os outros espaços circundantes.

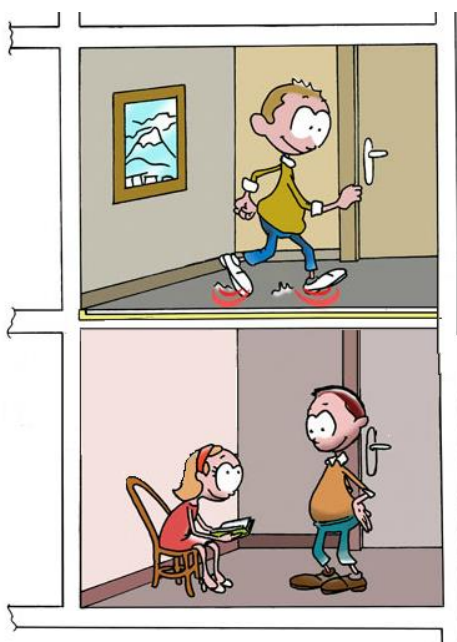


Figura 3.1 - Situação de uma sala de aula com bom isolamento a ruídos de percussão (adaptado de [15])

As salas de aula são espaços em que na maioria do tempo os seus ocupantes estão sentados, no entanto existem diversas situações em que é necessário o movimento de pessoas sobre o pavimento (figura 3.1) fazendo com que sejam transmitidos ruídos por percussão às salas situadas em seu redor. Um bom isolamento sonoro a ruídos de percussão de um edifício é fundamental para evitar o incómodo produzido por este fenómeno.

O ruído de percussão produzido pelo contacto com o pavimento é transmitido principalmente ao espaço que se encontra imediatamente abaixo da laje (transmissão direta), no entanto como a vibração causada pelo contacto com a laje é transmitida a toda a estruturado edifício, podendo o ruído ser sentido em compartimentos relativamente distantes do local em que foi produzido.

Existem diversas formas de criação de ruídos de percussão numa sala de aula de onde se salientam:

- Bater de portas;
- Queda de objetos;
- Arrastamento de cadeiras e mesas;
- Passos;
- Sistemas de ventilação de ar.

Podendo também chegar a uma sala de aula ruídos produzidos por espaços onde não existem aulas como é o caso do intenso ruído produzido nos corredores aquando da passagem de outros alunos ou o ruído de outros equipamentos que normalmente são colocados em locais distantes das salas de aula como é o caso de sistemas de bombagem.

Ora todas estas fontes são parte integrante e indispensável ao uso de uma escola, sendo por isso indispensável que as salas de aula sejam corretamente isoladas.

### 3.2. CÁLCULO DE ÍNDICE DE ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS DE PERCUSSÃO

#### 3.2.1. HISTÓRIA DOS ÍNDICES

A avaliação da transmissão de ruídos de percussão começou por ser feita no início da década de 1930, sendo a classificação dos diferentes pavimentos feita a partir de métodos unicamente subjetivos. O conhecimento do mecanismo de transmissão de ruídos de percussão estava pouco desenvolvido pelo que não eram utilizados parâmetros físicos na avaliação. Ora esta foi uma falha que motivou muitos investigadores a desenvolver trabalhos nesta área de forma a desenvolver métodos objetivos para a avaliação da transmissão de ruídos de percussão em edifícios.

As diversas investigações resultaram no desenvolvimento dos índices de isolamento sonoro a ruídos de percussão que possibilitaram, por volta de 1950 o aparecimento dos primeiros requisitos de isolamento sonoro em edifícios. Os índices de isolamento sonoro a ruídos de percussão têm evoluído com o passar dos anos, desde médias aritméticas por bandas de frequência até aos índices atuais que procuram ajustar os valores medidos a curvas de referência. [16]

A primeira norma internacional para isolamento sonoro de ruídos em edifícios surgiu em 1968 (ISO 717 *Rating of sound insulation for dwellings* [17]) e foi baseado maioritariamente no trabalho desenvolvido por investigadores alemães, como Gösele e Fasold. Nesta norma foi introduzido o conceito de curva de referência para a avaliação do isolamento sonoro. Para determinação do índice de isolamento utilizava-se uma regra de que o desvio desfavorável que a curva de 1/3 de oitava medida podia ter em relação à curva de referência era de 8 dB. O índice utilizado para determinação do índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão era  $I_p$ . [16]

Em 1982 foi publicada uma revisão da norma ISO 717 [18] em que a regra atrás descrita de que o desvio desfavorável não podia exceder 8 dB foi abolida, no entanto foi determinado que caso isso acontecesse deveria ser expresso. Foram introduzidos índices que perduram até aos dias de hoje ( $L'_{nT,w}$ ,  $L'_{n,w}$  e  $L_{nT,w}$   $L_{n,w}$ ).

Em 1996 foi revista a norma ISO 717 [19] que tomou praticamente a forma que atualmente se conhece. Foram introduzidos diferentes intervalos de medição e introduzido o termo de adaptação espectral  $C_1$ .

A última revisão ocorreu em 2013 e conservou a maioria das indicações de 1996, sendo que passa a permitir saltos 0,1 dB no ajustamento à curva de referência, mas apenas quando se calcula a incerteza.

Há que notar que enquanto a forma como se calculam os limites regulamentares de isolamento a ruídos de percussão foi mudando ao longo dos anos a curva de referência da ISO permanece a mesma. [16]

### 3.2.2. DETERMINAÇÃO DO ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS DE PERCUSSÃO SEGUNDO NP EN ISO 717-2

#### 3.2.2.1. Equipamento

Na medição do isolamento de ruídos de percussão é utilizado um instrumento denominado máquina de percussão normalizada (figura 3.2) ou mais vulgarmente chamada “máquina de passos”.



Figura 3.2 - Máquina de percussão normalizada [20]

Este equipamento não tem uma marca ou modelo específico tendo no entanto um conjunto de especificações que o equipamento deve respeitar e que são descritas na norma NP EN ISO 140-7 [21]:

- A máquina deve estar equipada com cinco martelos alinhados. Os centros de dois martelos adjacentes devem estar separados, um do outro, de 100 mm;
- A distância que separa os centros dos suportes da máquina de percussão e os eixos médios de martelos adjacentes deve ser de pelo menos 100 mm. Os suportes devem estar munidos de apoios capazes de isolar a propagação de vibrações;
- A máquina deve percutir o pavimento à razão de dez choques por segundo, sendo estes choques produzidos por cinco martelos, com massa de 500 g cada, caindo livremente de uma altura de 40 mm;
- A direção da queda dos martelos deve ser perpendicular à superfície ensaiada;
- Cada martelo deve possuir uma superfície cilíndrica com diâmetro de 30 mm, devendo esta superfície ser em aço temperado e esférica com raio de curvatura de 500 mm;
- A máquina de percussão deve ser totalmente automática sendo que os impactos devem ser separados por um intervalo de tempo médio de 100 ms.

A máquina de percussão normalizada tem sido criticada praticamente desde a sua criação, sendo que, as críticas baseiam-se fundamentalmente no argumento de que a máquina não representa um espectro suficientemente abrangente de todos os tipos de impactos que ocorrem na realidade.

### 3.2.2.2. Metodologia a utilizar no cálculo do isolamento sonoro a ruídos de percussão

A contabilização da transmissão de ruídos de percussão através de uma laje pode ser feita em laboratório, *in situ* ou através de métodos de dimensionamento.

A medição da transferência de ruídos de percussão não pode ser feita pela diferença entre os níveis de pressão num espaço emissor e num espaço recetor, uma vez que o ruído produzido no espaço emissor só tem uma pequena relação com o medido no espaço recetor.

Os ensaios *in situ* de pavimentos devem ser feitos sob a ação de uma percussão normalizada de acordo com as normas EN ISO 10140-3 [22] e NP EN ISO 140-7 [21]. Este ensaio será utilizado nas medições efetuadas no capítulo 7 e aí se fará uma descrição das opções adotadas, dos equipamentos utilizados e da metodologia de medição.

Depois de feitas as medições e obtidos os valores de  $L_i$  (nível de pressão sonora médio medido no compartimento recetor) deve-se proceder ao cálculo dos parâmetros existentes no regulamento a partir das seguintes expressões:

$$L'_{nT} = L_i - 10\log(T/T_0) \quad \text{cf. RRAE 2008 [23]} \quad (3.1)$$

$$L'_n = L_i - 10\log(A_0/A) \quad \text{cf. RRAE 2002 [24]} \quad (3.2)$$

Sendo:

- $L'_{nT}$  – nível de pressão sonora padronizado (dB/oit. ou de preferência dB/terço de oitava);
- $L'_n$  – nível de pressão sonora normalizado (dB/oit. ou de preferência dB/terço de oitava);
- $L_i$  – nível de pressão sonora média no compartimento recetor (dB/oit. ou de preferência dB/terço de oitava);
- $T$  – tempo de reverberação do compartimento recetor (s);
- $T_0$  – tempo de reverberação de referência (normalmente  $T_0 = 0,5$  s);
- $V$  – volume do compartimento recetor ( $m^3$ );
- $A$  – absorção sonora do compartimento recetor ( $m^2$ );
- $A_0$  – absorção sonora de referência ( $=10 m^2$ ).

De forma a obter os valores ajustados do índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão por bandas de frequências deve-se proceder de acordo com a NP EN ISO 717-2 [25]. O procedimento a seguir é:

- 1) Obter os  $L'_{nT} / L'_n$  (em dB/oitava ou de preferência em dB/terço de oitava);
- 2) Arbitrar uma primeira curva de referência (quadro 3.1), utilizando valores sem casas decimais;
- 3) Ajustar esses valores reais ( $L'_{nT} / L'_n$ ) com a curva de referência (CR) de forma que a soma dos afastamentos  $\Delta i = L'_{nT} - CR$  a dividir pelo número de bandas de frequência utilizadas (5 ou 16 dependendo se utilizar bandas de 1/1 oitava ou 1/3 oitava respetivamente) seja o maior possível sem ultrapassar 2,0. Só se deve considerar os afastamentos positivos ou seja que CR está abaixo da curva dos  $L'_{nT}$ ;
- 4) O valor de  $L'_{nT,w}$  ou  $L'_{n,w}$  corresponde à ordenada da curva ajustada para a banda de frequências dos 500 Hz. Se forem utilizadas bandas de 1/1 oitava, ao valor obtido de  $L'_{nT}$  ou  $L'_n$  há que subtrair 5 dB para obter o valor de  $L'_{nT,w} / L'_{n,w}$  em dB/terço de oitava.

Quadro 3.1 - Valores da curva CR [1]

Parâmetro	Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1250	1,6k	2k	2,5k	3,15k
$L'_{nT,w}$	1/1 oit.	0			0			-2			-5			-18			
$L'_{n,w}$	1/3 oit.	0	0	0	0	0	0	-1	-2	-3	-4	-5	-8	-11	-14	-17	-20

A obtenção do índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão pode também ser feita em laboratório, sendo que nesse caso o parâmetro perde a plica (') passando a denominar-se  $L_{n,w}$ .

### 3.2.2.3. Termos de adaptação espectral

A caracterização efetuada pelo índice  $L'_{nT,w}$  de acordo com a norma NP EN ISO 717-2 [25] é considerada insuficiente na forma como tem em conta os picos de nível de pressão sonora em frequências isoladas e baixas como os que ocorrem nos pavimentos que integram barrote de madeira ou pavimentos de betão não revestidos. Introduziu-se por isso um termo de adaptação espectral  $C_I$  para ter em conta este efeito. Este parâmetro foi definido de forma que:

- Em pavimentos com revestimentos eficazes tome valores próximos de zero;
- Em pavimentos com picos predominantes nas baixas frequências, como pavimentos em barrote de madeira, tome valores ligeiramente superiores a zero;
- Em pavimentos de betão com revestimento pouco eficaz ou sem revestimento tome valores entre -15 e 0 dB.

O termo de adaptação espectral ( $C_I$ ) pode ser calculado através de:

$$C_I = (L'_{nT,sum} - 15 - L'_{nT,w}) \quad (3.3)$$

Em que:

- $C_I$  – Termo de adaptação espectral;
- $L'_{nT,w}$  – Índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão padronizado e ajustado à curva de referência;
- $L'_{nT,sum}$  – (soma energética dos valores dos níveis de pressão sonora resultante da medição por terços de oitava entre 100 e 2500 Hz ou por oitavas entre 100 e 2000 Hz).

A soma energética pode ser feita para outros intervalos de bandas de frequências, normalmente mais alargados, sendo que para isso junto do termo  $C_I$  deve ser indicado o intervalo utilizado. Por exemplo para somas de intervalos de bandas de frequências entre 50 e 2500 Hz o termo de adaptação espectral deve ser apresentado como  $C_{I,50-2500}$ .

$$L_{sum} = 10 \log \sum_{i=1}^k 10^{L_i/10} \text{ dB} \quad (3.4)$$

#### 3.2.2.4. Índice de redução sonora a ruídos de percussão

O aumento de isolamento sonoro a ruídos de percussão conferidos por revestimentos de piso pode ser determinado através do índice de redução sonora a sons de percussão  $\Delta L_w$  calculado de acordo com a norma NP EN ISO 717-2 [25].

A redução sonora conferida pelos revestimentos de piso numa laje de betão homogénea, como descrito na norma EN ISO 10140-1 [26], é independente do isolamento sonoro a ruídos de percussão da laje sem revestimento ( $L_{n,0}$ ). No entanto como o índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão de um pavimento, com e sem revestimento de piso aplicado, depende até certo ponto de  $L_{n,0}$  utiliza-se um pavimento de referência que permita a obtenção de valores de  $\Delta L_w$  comparáveis entre diferentes laboratórios.

Assim o índice de redução sonora a ruídos de percussão ( $\Delta L_w$ ) pode ser calculado através da expressão 3.6.

$$L_{n,r} = L_{n,r,0} - \Delta L \quad (3.5)$$

$$\Delta L_w = L_{n,r,0,w} - L_{n,r,w} = 78 \text{ dB} - L_{n,r,w} \quad (3.6)$$

Sendo que:

- $L_{n,r}$  representa o nível de pressão sonora, normalizado, devido à excitação de impacto, calculado para o pavimento de referência com o revestimento de ensaio;
- $L_{n,r,0}$  representa o nível de pressão sonora, normalizado, devido à excitação de impacto, definido para o pavimento de referência com o revestimento de ensaio (segundo Quadro 4 da norma NP EN ISO 717-2 [25]);
- $\Delta L$  representa a redução do nível de pressão sonora, devido à excitação de impacto medida de acordo com a norma EN ISO 10140-1 [26];
- $L_{n,r,w}$  representa o nível de pressão sonora, normalizado, devido à excitação de impacto, calculado para o pavimento de referência com o revestimento de piso em ensaio;
- $L_{n,r,0,w}$  é obtido a partir de  $L_{n,r,0}$  ajustado à curva de referência dada na norma NP EN ISO 717-2 [25]. Toma o valor de 78 dB após feito o ajuste.

#### 3.2.3. DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE ISOLAMENTO SONORO (IIC) SEGUNDO NORMA ASTM E 989

Em vários países as normas ISO não são seguidas e os índices presentes nos regulamentos para avaliação do isolamento sonoro a ruídos de percussão não são  $L'_{nT,w}$  nem  $L'_{n,w}$  mas sim o parâmetro IIC (*impact insulation class*). O índice é calculado de acordo com a norma ASTM E 989 [27] e deve apenas ser usado para medições em bandas de frequência de 1/3 de oitava das bandas situadas entre 100 e 3150 Hz. A máquina de percussão normalizada é descrita na norma ASTM E 492 [28]. Este índice, ao contrário do que acontece com  $L'_{nT,w}$  e  $L'_{n,w}$ , ao tomar valores mais elevados representa melhores índices de isolamento sonoro a ruídos de percussão.

O índice IIC é utilizado para medições em laboratórios, sendo que para medições *in situ* é utilizado o parâmetro FIIC (*field impact insulation class*). No cálculo de FIIC os valores dos níveis sonoros de ruídos de percussão medidos *in situ* devem ser normalizados para uma área de referência de 10 m<sup>2</sup>, efetuando-se o mesmo processo que no cálculo de  $L'_n$ . O processo de ajustamento à curva de referência para o cálculo de FIIC efetuado para as medições no terreno são, depois da normalização do nível sonoro, exatamente iguais ao processo utilizado no cálculo de IIC.

No cálculo do índice IIC deve-se:

- Arredondar à unidade mais próxima os valores medidos do nível sonoro de ruídos de percussão  $L(f)$ ;
- Utilizar os valores do Quadro 3.2 como curva de referência  $C(f)$  para comparação com a curva dos valores medidos;
- Ajustar a curva de referência à curva dos valores medidos, sendo que para isso se deve somar a todos os valores de  $C(f)$  uma constante  $T$  que deve ser o maior número possível que faça com que a soma das diferenças positivas de  $L(f) - (C(f)+T)$  seja a maior possível sem exceder o valor de 32 dB;
- Aumentar o valor de  $T$ , se necessário, de forma que nenhum valor da diferença  $L(f) - (C(f)+T)$  seja superior a 8 dB;
- O valor do índice é dado por  $110 - T$ .

Depois de efetuar estes passos o valor de IIC corresponde ao valor da curva de referência  $(C(f)+T)$  na banda de frequência de 500 Hz (figura 3.3).

Quadro 3.2 - Valores da curva  $C(f)$  para cada frequência [27]

Frequência (Hz)	$C(f)$ (dB)	Frequência (Hz)	$C(f)$ (dB)
100	2	630	-1
125	2	800	-2
160	2	1000	-3
200	2	1250	-6
250	2	1600	-9
315	2	2000	-12
400	1	2500	-15
500	0	3150	-18

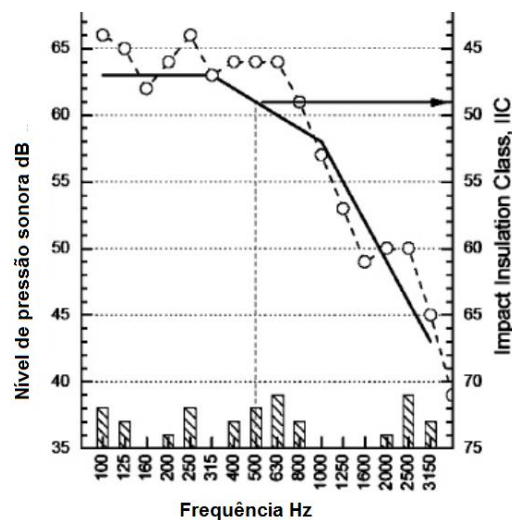


Figura 3.3 - Exemplo de determinação de IIC (curva  $L(f)$  a tracejado e curva  $C(f)+T$  a traço contínuo) [27]

### 3.2.4. CURVAS DE REFERÊNCIA PARA CÁLCULO DO ISOLAMENTO SONORO DE RUÍDOS DE PERCUSSÃO

#### 3.2.4.1. Curva da norma ISO 717-2

Na base da determinação dos índices usados atualmente para caraterizar o isolamento sonoro a ruídos de percussão está o ajuste da curva dos valores medidos a uma curva de referência (figura 3.4). Ao longo dos anos a extensão e análise da curva de referência usada foi sendo discutida e novas curvas foram sugeridas por vários especialistas em acústica, no entanto esta curva prevaleceu até aos dias de hoje.

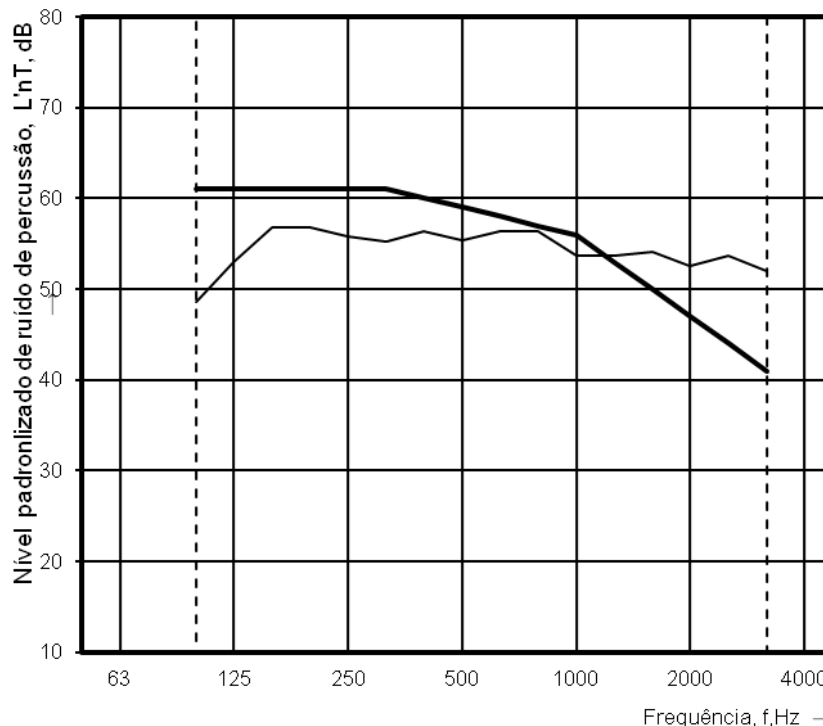


Figura 3.4 - Curva de referência ISO para determinação do isolamento sonoro a ruídos de percussão [25]

A curva estende-se ao longo das bandas de frequências entre 100 e 3150 Hz. A sua forma possui declive nulo entre as bandas de 100 e 315 Hz declive negativo de 1dB/terço de oitava entre as bandas de 315 e 1000 Hz e declive negativo de 3dB/terço de oitava entre as bandas de 1 e 3,15 kHz.

#### 3.2.4.2. Curva de Gösele

Em 1965 Gösele apresentou a curva que considerava melhor se ajustar ao cálculo do índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão. [29]

Segundo ele a curva de ponderação devia ter dois objetivos principais: ser capaz de ajustar o som à sensibilidade do ouvido humano e ajustar as diferenças entre o ruído produzido pela máquina de percussão normalizada e os ruídos de percussão que acontecem na realidade. Este segundo aspeto torna-se bastante evidente para quem já presenciou um ensaio de isolamento de ruídos de percussão com uso da máquina de percussão, pois o ruído produzido no ensaio é demasiado elevado em comparação com o que acontece na realidade. Não sugeria, ao contrário de outros autores alterações à máquina de percussão normalizada. [30]



Gösele sugeriu a curva da figura 3.5 para a determinação do índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão.

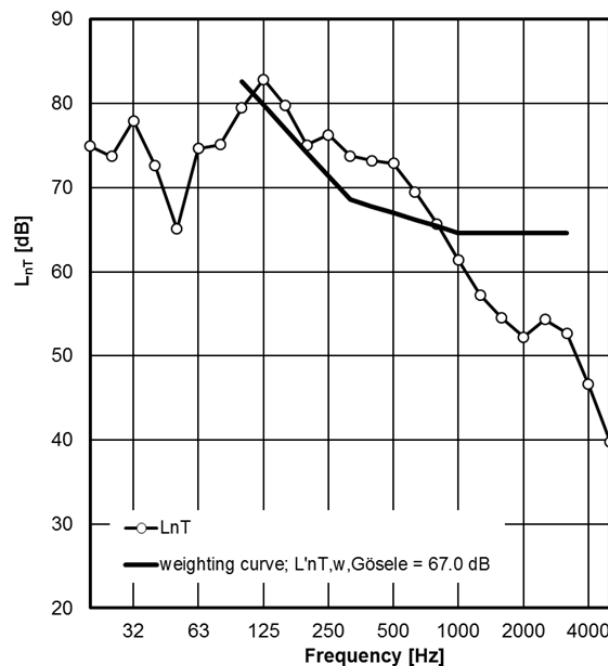


Figura 3.5 - Curva sugerida por Gösele para determinação do índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão [30]

A curva de referência proposta por Gösele estende-se dos 100 Hz até aos 3,15 kHz e possui valores mais elevados nas baixas frequências. A forma de proceder ao ajuste da curva medida em relação à curva de referência é igual à usada na norma ISO 717-2 [25]. O índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão corresponde ao ponto da curva de referência nos 500 Hz.

#### 3.2.4.3. Curva de Fasold

Fasold publicou em 1965 a curva de referência (figura 3.6) que para si melhor se adaptava ao cálculo do isolamento sonoro a ruídos de percussão. Fasold defendia a definição de um objetivo mínimo que o isolamento sonoro a ruídos de percussão deveria proporcionar para que os residentes dos edifícios não se sentissem incomodados pelo ruído. Este ruído era determinado com o uso de parâmetros subjetivos de avaliação do ruído de percussão. [31]

Assim definiu o espectro de ruído que é transmitido por uma laje de forma a poder calcular a curva teórica que melhor caracteriza a transmissão de ruídos de percussão em edifícios.

Esta curva de referência engloba as frequências de 50 a 5 kHz, sendo constante desde os 100 Hz aos 3,15 kHz (largura de frequências em que a curva utilizada na norma ISO 717-2 [25] se desenvolve). Entre os 50 e os 100 Hz decresce, assim como entre os 3,15 e 5 kHz.

Para Fasold a curva utilizada na norma NP EN ISO 717-2 [25] dá demasiada importância às frequências altas, dando resultado a índices exageradamente baixos quando são tomadas medidas que aumentam o isolamento sonoro nesta gama de frequências. As melhorias são ineficazes nas frequências mais baixas

resultando num isolamento sonoro a ruídos de percussão real não condizente com o índice calculado. Ou seja o índice objetivo não corresponde à percepção dos habitantes do edifício.

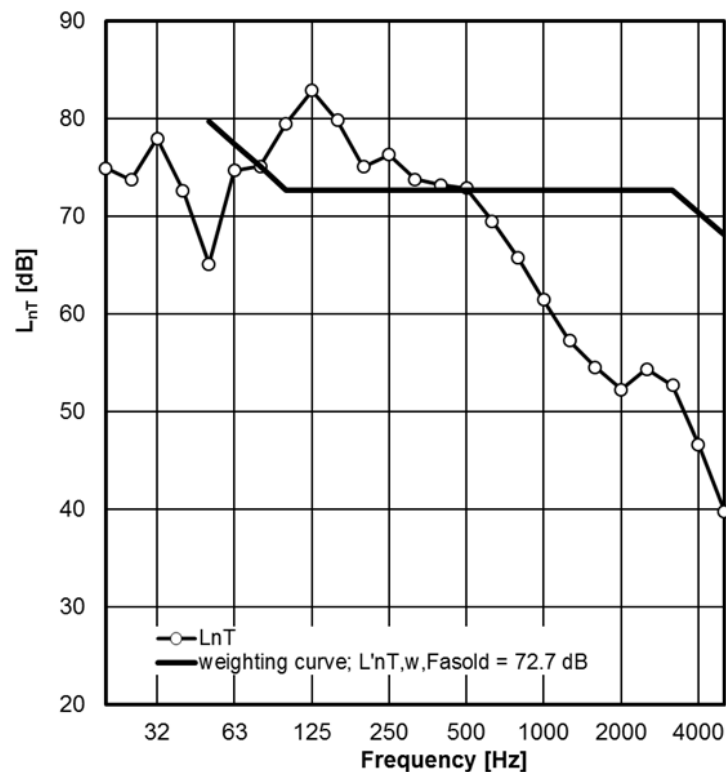


Figura 3.6 - Curva sugerida por Fasold para determinação do índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão [30]

#### 3.2.4.4. Curva de Bodlund

Bodlund defendia que uma série de alterações à norma em vigor na altura que para si iriam melhorar o cálculo do isolamento sonoro a ruídos de percussão. As alterações passavam pelo uso de uma nova fonte de percussão que substituiria a (já utilizada na altura) máquina de percussão normalizada, ou a modificação da forma como se calculava o índice de isolamento a ruídos de percussão. [32]

Em 1985, Bodlund publicou *Alternative Reference Curves for Evaluation of the Impact Sound Insulation between Dwellings* [32] que resultava de um vasto estudo levado a cabo na Suécia e no qual apresentou uma curva de referência (figura 3.7) que obteve por correlação entre a percepção subjetiva dos residentes nos edifícios analisados e os índices de isolamento a ruídos de percussão obtidos através de diferentes curvas de ponderação. As respostas subjetivas consideradas foram principalmente recolhidas através de entrevista telefónica aos residentes nas 22 áreas residenciais analisadas. A amostra analisada continha uma larga dispersão de resultados observando-se resultados de índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão ( $L'_{n,w}$ ) entre 37 e 70 dB.

O questionário efetuado usava classificações entre 1 e 7 (1-isolamento sonoro muito fraco, 7-isolamento sonoro muito bom), considerando-se uma média de 4,4 ao questionário como o mínimo necessário para se considerar que os requisitos de isolamento estavam cumpridos. [32]

Os índices de isolamento sonoro a ruídos de percussão obtidos com a sua curva mostravam uma melhor correlação com a avaliação subjetiva do que a curva ISO.

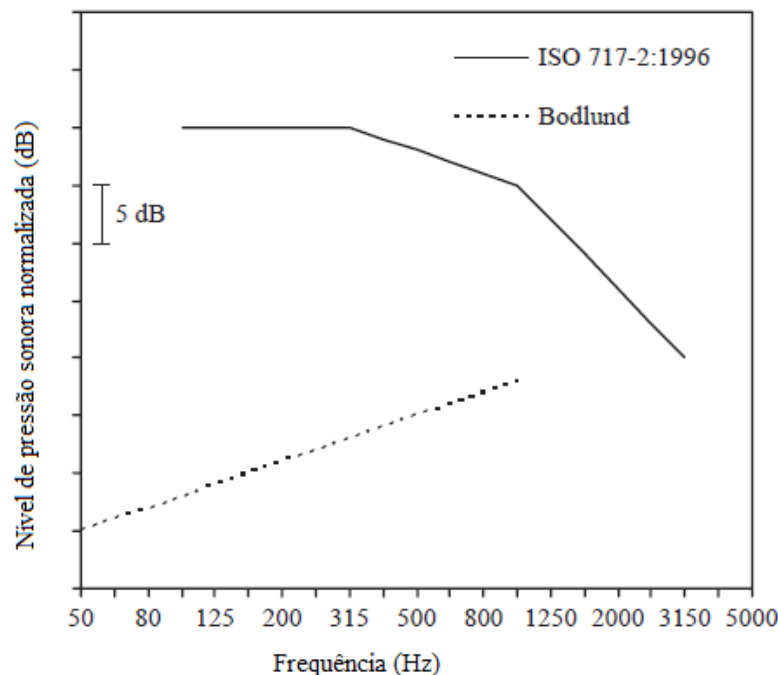


Figura 3.7 - Comparação da curva de referência sugerida por Bodlund para determinação do índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão com a curva utilizada na norma ISO 717-2 (adaptado de [33])

A curva apresentada engloba as bandas de frequências desde os 50 Hz até aos 1 kHz e cresce linearmente com incrementos de 1 dB por cada banda de 1/3 de oitava. Valores acima dos 1 kHz e abaixo dos 50 Hz não são considerados por este método, sendo que a forma como se calcula o índice é semelhante ao utilizado na norma ISO 717-2 [25] calculando-se a máxima soma de desvios positivos que não excedam 32 dB. O valor do índice de isolamento a ruídos de percussão corresponde à ordenada da curva de referência nos 500 Hz.

Apesar da curva apresentada por Bodlund apresentar uma correlação muito boa com os parâmetros subjetivos, o seu trabalho recebeu algumas críticas por considerar a banda de 1 kHz como limite máximo da curva, quando se considera que as frequências mais altas têm um importante papel na transmissão de ruídos de percussão em alguns tipos de piso.

#### 3.2.4.5. Curva de Hagberg

O trabalho de Hagberg, *Evaluating Field Measurements of Impact Sound* [34], é fortemente baseado na investigação de Bodlund [32] e pode ser entendido como uma continuação do mesmo. Neste trabalho Hagberg utilizou dados de doze tipos lajes previamente analisadas por Bodlund adicionando-lhe mais dez tipos que o próprio analisou. Considerou assim um total de vinte e dois tipos de lajes.

As amostras proporcionavam um total de 146 tipos de elementos construtivos (lajes e revestimentos de piso) com uma abrangência de resultados de isolamento sonoro a ruídos de percussão ( $L'_{n,w}$ ) entre 31 e 78 dB. [34]

Hagberg procurou relacionar a análise subjetiva dos habitantes dos edifícios com os índices que obtinha. Com a sua investigação concluiu que as bandas de frequências abaixo dos 100 Hz (frequência mínima analisada atualmente pela curva ISO) têm uma importante influencia na transmissão de ruídos de percussão, uma vez que a melhor correlação que conseguiu (cerca de 96%) foi obtida considerando a adaptação espectral  $C_{1,50-2500}$ . Concluiu também que as frequências mais altas (acima de 1 kHz) devem ser consideradas na curva de referência uma vez que a transmissão de ruídos de percussão em lajes pesadas com revestimentos duros tem um valor significativo. [34]

A primeira curva introduzida por Hagberg (figura 3.8) aumenta 5,5 dB por 1/3 de oitava entre os 50 e 100 Hz, prolongando-se depois com ordenada constante até aos 3,15 kHz.. O método de ajuste da curva medida á curva de referência é igual ao utilizado na norma ISO 717-2 [25].

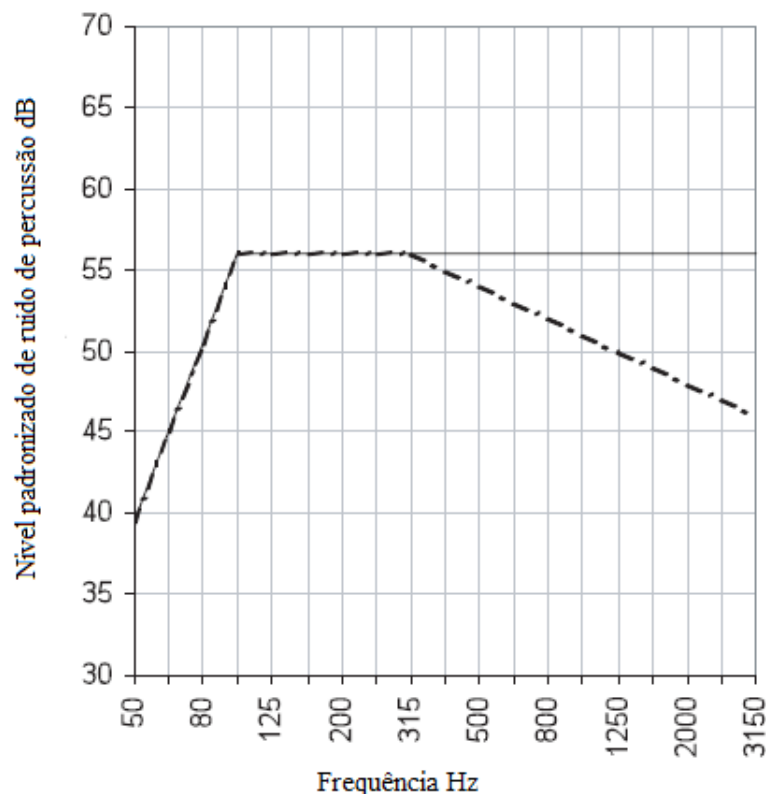


Figura 3.8 - Primeira (traço continuo) e segunda (a traço interrompido) curvas de Hagberg para determinação de isolamento sonoro a ruídos de percussão (adaptado de [34])

Após considerações seguintes Hagberg concluiu que a curva de referência (figura 3.8) deveria ter uma inclinação decrescente a partir dos 315 Hz, uma vez que em lajes pesadas com revestimentos de piso duros poderiam causar problemas de isolamento sonoro a ruídos de percussão nas frequências mais altas.

O decréscimo é de 1 dB por terço de oitava que esta nova curva apresenta não se fundamenta nenhum novo tipo de investigação em relação ao feito para a construção da primeira curva. Existe no entanto uma constatação do autor que não possui suficiente informação para uma exata avaliação destas frequências.

É referido no entanto que esta nova curva apresenta o mesmo grau de correlação que a anterior.

### 3.2.5. FONTES DE PERCUSSÃO ALTERNATIVAS - JAPANESE RUBBER BALL

A bola de borracha Japonesa (figura 3.9) foi desenvolvida por Tachibana [35] e teve como principal objetivo proporcionar uma melhor correspondência com os ruídos de percussão mais suaves como os gerados pelos passos de pessoas ou crianças. Esta é uma fonte de impacto com 2,5 kg que é largada de uma altura de 1 m proporcionando uma força de impacto de cerca de um terço da exercida pela máquina de percussão normalizada enquanto a duração do impacto é de 20 ms tal como no caso da máquina de percussão normalizada. Este tipo de fonte de ruído de percussão cria um som intermitente ao contrário da máquina de percussão que cria um ruído contínuo. [35]

Esta fonte de percussão já é reconhecida pelas normas ISO possuindo atualmente um ensaio normalizado [36]. Esta organização ainda não definiu um método de cálculo que permita a obtenção de um índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão usando esta fonte sonora.



Figura 3.9 - Japanese rubber ball (adaptado de [35])

### 3.2.6. COMPARAÇÃO ENTRE ÍNDICES OBJETIVOS E SUBJETIVOS NA ANÁLISE DO ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS DE PERCUSSÃO

Os índices de isolamento sonoro a ruídos de percussão proporcionam uma visão objetiva acerca do ruído que ultrapassa um elemento construtivo onde se utilizam ensaios acústicos normalizados. No entanto já muitos autores constataram que os índices objetivos não proporcionam uma correta relação com os índices subjetivos provenientes da opinião dos moradores das habitações analisadas por questionário.

As diferenças entre os índices objetivos e subjetivos ocorrem em edifícios com pavimentos leves onde as baixas frequências não analisadas nos parâmetros objetivos provocam incómodo nas avaliações subjetivas. Estas diferenças são ainda mais visíveis nos casos de edifícios com estrutura de madeira ou aço, uma vez que os atuais descritores foram criados para terem uma boa descrição do isolamento sonoro a ruídos de percussão em edifícios de betão. [30]

A grande dificuldade de avaliação dos índices subjetivos passa pela elaboração dos inquéritos e com a diferente opinião inerente a cada indivíduo. Atualmente não existe um questionário universalmente aceite o que dificulta a implementação deste tipo de análise. [30]

Assim se pode constatar que os índices objetivos ainda necessitam de ajustes de forma a providenciarem uma boa análise da transmissão de ruídos de percussão em todos os tipos de edifícios.

### 3.2.7. INFLUÊNCIA DO RUÍDO AÉREO CRIADO PELA MÁQUINA DE PERCUSSÃO NORMALIZADA

No ensaio descrito na norma ISO 140-7 [21] de medição *in situ* do isolamento sonoro a ruídos de percussão em pavimentos a utilização da máquina de impactos normalizada para além de gerar vibrações na estrutura do edifício, responsáveis pelo ruído de percussão que irá ser medido no outro compartimento, gera também ruído aéreo de intensidade bastante apreciável e que pode atravessar a laje e adulterar os níveis de pressão sonora medidos no compartimento recetor.

Como o isolamento sonoro a ruídos aéreos depende em grande parte da massa do elemento separador este problema é sobretudo relevante quando os pavimentos proporcionam um baixo isolamento a ruídos aéreos, ou quando os elementos que se ligam ao pavimento não proporcionam um bom isolamento a ruídos aéreos (ocorrência de transmissões marginais elevadas). [37]

O problema causado pela geração de ruído aéreo pela máquina de percussão na maioria dos pavimentos atuais utilizados em Portugal pode-se considerar desprezável. Esta interferência apenas seria importante em casos que proporcionem um bom isolamento a ruídos de percussão e um mau isolamento a ruídos aéreos. [37]

### 3.2.8. COMPARAÇÃO DOS ÍNDICES UTILIZADOS NA EUROPA

Na Europa existe uma grande discrepância entre países não só quanto aos limites a ruídos de percussão que cada país permite, mas também na forma como calculam o isolamento sonoro de ruídos de percussão. [38]

Atualmente a maioria dos países usa o intervalo de frequências entre 100 e 3150 Hz na medição e cálculo do isolamento sonoro a ruídos de percussão. No entanto nos últimos anos estudos indicam que é necessário a análise de frequências abaixo dos 100 Hz de forma a ter em conta o ruído que os passos dados pelas pessoas causam. Este problema parece ter ainda um maior impacto nas construções com materiais mais leves. Em 1996 com a introdução, na norma ISO 717 [19], de termos de adaptação espectral passou a ser possível analisar bandas de frequências entre 50 e 5000 Hz. [39]

Os países nórdicos, que utilizam construção bastante leve, foram os primeiros a passar a utilizar estes termos, no entanto apenas a Suécia utiliza a obrigatoriedade do seu uso.

Analisando um total de 30 países considerados em espaço europeu (quadro 3.3) existem cinco diferentes tipos índices de isolamento sonoro a ruídos de percussão.

Quadro 3.3 - Índices de isolamento sonoro a ruídos de percussão utilizados em diferentes países europeus em 2013 (adaptado de [39])

Ruídos de percussão			
País	Índice utilizado	País	Índice utilizado
<b>Áustria</b>	$L'_{nT,w}$	<b>Itália</b>	$L'_{n,w}$
<b>Bélgica</b>	$L'_{nT,w}$	<b>Letónia</b>	$L'_{n,w}$
<b>Bulgária</b>	$L'_{n,w}$	<b>Lituânia</b>	$L'_{n,w}$
<b>Croácia</b>	$L'_w$	<b>Holanda</b>	$L'_{nT,w}+C_i$
<b>Rep. Checa</b>	$L'_{n,w}$	<b>Noruega</b>	$L'_{n,w}$
<b>Dinamarca</b>	$L'_{n,w}$	<b>Polónia</b>	$L'_{n,w}$

<b>Inglaterra</b>	$L'_{nT,w}$	<b>Portugal</b>	$L'_{nT,w}$
<b>Estónia</b>	$L'_{n,w}$	<b>Roménia</b>	$L'_{n,w}$
<b>Finlândia</b>	$L'_{n,w}$	<b>Escócia</b>	$L'_{nT,w}$
<b>França</b>	$L'_{nT,w}$	<b>Sérvia</b>	$L'_{n,w}$
<b>Alemanha</b>	$L'_{n,w}$	<b>Eslováquia</b>	$L'_{n,w}$ ou $L'_{nT,w}$
<b>Grécia</b>	$L'_{n,w}$	<b>Eslovénia</b>	$L'_{n,w}$
<b>Hungria</b>	$L'_{n,w}$	<b>Espanha</b>	$L'_{nT,w}$
<b>Islândia</b>	$L'_{n,w}$	<b>Suécia</b>	$L'_{n,w} + C_{l,50-2500}$
<b>Irlanda</b>	$L'_{nT,w}$	<b>Suíça</b>	$L'_{nT,w} + C_i$

Além da grande diferença existente entre os índices utilizados existem diversas recomendações diferentes que cada país implementa. A harmonização de regulamentos é impossível atualmente, no entanto a redução do número de índices existentes pode abrir caminho a um regulamento europeu único que contemple várias classes de limites de acordo com as necessidades de cada país. [39]

Esta elevada discrepância de índices cria problemas para o desenvolvimento do conhecimento na área da transmissão de ruídos de percussão.

### 3.3. TRANSMISSÕES DIRETAS E MARGINAIS DE RUÍDOS DE PERCUSSÃO

Como já foi dito os ruídos de percussão são transmitidos diretamente à estrutura do edifício fazendo-a entrar em vibração (figura 3.10). O grande responsável pela transmissão de ruídos de percussão resultantes do impacto com o pavimento é a laje separadora dos compartimentos, no entanto a transmissão dos ruídos também se dá através dos elementos construtivos rigidamente ligados à laje. A este último caminho percorrido pelo ruído dá-se o nome de transmissão marginal. As transmissões marginais são responsáveis não só por fazer chegar o ruído a compartimentos adjacentes àquele em que foi produzido o impacto, como também a outros compartimentos situados no mesmo edifício e que partilham a mesma estrutura.

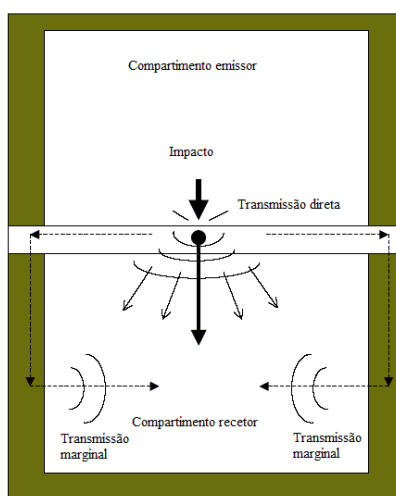


Figura 3.10 - Transmissão de ruídos de percussão por caminho direto e marginal (adaptado de [40])

### 3.4. MODELOS DE PREVISÃO DE ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS DE PERCUSSÃO

#### 3.4.1. MÉTODO DE CREMER

Os métodos de previsão de isolamento sonoro a ruídos de percussão embora não proporcionem resultados reais como as medições *in situ* são muito importantes em fase de projeto pois permitem fazer uma escolha consciente da solução construtiva a implementar de acordo com a utilização do espaço.

Um dos métodos mais populares para efetuar a previsão do nível de pressão sonora ( $L_n$ ) que passa através de um elemento estrutural é o método de Cremer que é descrito no anexo B da norma EN 12354-2 [41]. Este método utiliza a expressão 3.7.

$$L_n \approx 155 - 30 \log(m) + 10 \log(\sigma) + 10 \log(T_s) + 10 \log\left(\frac{f}{f_{ref}}\right) \quad (3.7)$$

Sendo que:

- $m$  representa a massa por unidade de área  $\text{kg/m}^2$ ;
- $T_s$  representa tempo de reverberação estrutural em segundos;
- $\sigma$  representa o fator de radiação;
- $f_{ref}$  representa a frequência de referência ( $f_{ref}=100 \text{ Hz}$ ).

#### 3.4.2. MÉTODO SIMPLIFICADO

O modelo simplificado dá a previsão do isolamento sonoro a ruídos de percussão de acordo com os valores das massas dos elementos envolventes. A sua aplicação é restrita a compartimentos localizados um acima do outro e apenas se aplica a pavimentos de betão. Assim a forma mais rápida de prever o isolamento sonoro a ruídos de percussão é dada pela expressão:

$$L'_{n,w} = L_{n,w} + K_{TM} - \Delta L_w = (164 - 35 \log(m)) + K_{TM} \quad (3.8)$$

Sendo que:

- $m$  representa a massa por unidade de área  $\text{kg/m}^2$ ;
- $K_{TM}$  representa uma constante para atender ao efeito das transmissões marginais (representadas no quadro 3.4);
- O valor de 164 é conservador tendo em conta as lajes utilizadas em Portugal podendo subir até 169.

Quadro 3.4 - Valores das correções  $K_{TM}$  segundo EN 12354-2 [41]

Massa superficial do pavimento ( $\text{kg/m}^2$ )	Massa superficial média dos elementos marginais homogêneos e não revestidos ( $\text{kg/m}^2$ )								
	100	150	200	250	300	350	400	450	500
<b>100</b>	1	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>150</b>	1	1	0	0	0	0	0	0	0
<b>200</b>	2	1	1	0	0	0	0	0	0
<b>250</b>	2	1	1	1	0	0	0	0	0



<b>300</b>	3	2	1	1	1	0	0	0	0
<b>350</b>	3	2	1	1	1	1	0	0	0
<b>400</b>	4	2	2	1	1	1	1	0	0
<b>450</b>	4	3	2	2	1	1	1	1	1
<b>500</b>	4	3	2	2	1	1	1	1	1
<b>600</b>	5	4	3	2	2	1	1	1	1
<b>700</b>	5	4	3	3	2	2	1	1	1
<b>800</b>	6	4	4	3	2	2	2	1	1
<b>900</b>	6	5	4	3	3	2	2	2	2

### 3.5. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS DE PERCUSSÃO

O isolamento sonoro a ruídos de percussão é medido através do nível sonoro que durante o ensaio normalizado chega a uma sala recetora. Ora este método, ao contrário do que acontece nos ruídos aéreos em que se mede a redução sonora que um elemento produz, não permite classificar as lajes através da redução de transmissão de ruído que a laje proporciona, tornando mais difícil a avaliação da qualidade de isolamento que uma laje possui.

A avaliação da qualidade do isolamento sonoro a ruídos de percussão de um sistema deve então ser avaliada de acordo com a opinião subjetiva das pessoas. Apresenta-se no quadro 3.5 uma divisão dos valores de isolamento sonoro a ruídos de percussão em classes de qualidade.

Quadro 3.5 - Divisão dos índices de isolamento sonoro a ruídos de percussão em classes qualidade (adaptado de [42])

<b>Classe</b>	<b><math>L'_{nT,w}</math> (dB)</b>	<b>Avaliação da qualidade</b>
<b>A+</b>	$\leq 49$	Excelente
<b>A</b>	50-52	Muito Boa
<b>B</b>	53-55	Boa
<b>C</b>	56-58	Razoável
<b>D</b>	59-61	Razoável
<b>E</b>	62-64	Fraca
<b>F</b>	65-67	Muito Fraca
<b>G</b>	$\geq 68$	Intolerável



# 4

## SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS PARA REDUÇÃO DE RUÍDOS DE PERCUSSÃO

### 4.1. SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS PARA PAVIMENTOS

#### 4.1.1. ALCATIFA

Para controlar os ruídos de percussão existem basicamente três formas de proceder: atuar na fonte do ruído, atuar no caminho da transmissão ou atuar perto do recetor.

Uma das melhores formas de controlar a transmissão de ruídos de percussão é a colocação de alcatifa (figura 4.1) como revestimento de um piso rígido, uma vez que a alcatifa funciona como amortecedor dos impactos que provocam a criação dos ruídos de percussão. A eficácia de redução dos ruídos de impacto dos revestimentos de piso depende em larga escala das características físicas do material, sendo uma das mais importantes a rigidez dinâmica. Estudos demonstram que em muitos materiais a rigidez dinâmica depende da frequência. [43]



Figura 4.1 - Piso em alcatifa [44]

A alcatifa pode proporcionar um aumento do isolamento a ruídos de percussão da ordem dos 20 a 35 dB dependendo da espessura desta camada. Esta é uma solução que atua sob a fronteira entre a fonte de ruído e o caminho de transmissão. [1]

O valor da eficácia de uma alcatifa ( $\Delta L$ ) pode ser dado pela fórmula de Cremer:

$$\Delta L = 40 \log\left(\frac{f}{f_0}\right) \quad (4.1)$$

Em que:

- $f$  representa a frequência analisada (Hz);
- $f_0$  representa a frequência de ressonância (Hz) a partir da qual se observa o aumento de isolamento sonoro a ruídos de percussão.

Analisando a fórmula anterior é possível constatar que a duplicação da frequência de ressonância provoca um aumento de 12 dB de isolamento sonoro.

A frequência de ressonância  $f_0$  pode ser calculada através de:

$$f_0 = 0,006 \sqrt{\frac{E}{h}} \quad (4.2)$$

Em que:

- $E$  representa a força por unidade de área ( $\text{N/m}^2$ );
- $h$  representa a espessura em metros (m).

#### 4.1.2. LAJE FLUTUANTE

Uma outra forma de proceder ao isolamento sonoro a ruídos de percussão será a colocação de uma laje flutuante (figura 4.2). Esta é uma excelente solução uma vez que para além de proporcionar um isolamento sonoro a ruídos de percussão elevado é responsável também pelo aumento do isolamento sonoro a ruídos aéreos proporcionado pelo aumento da massa.

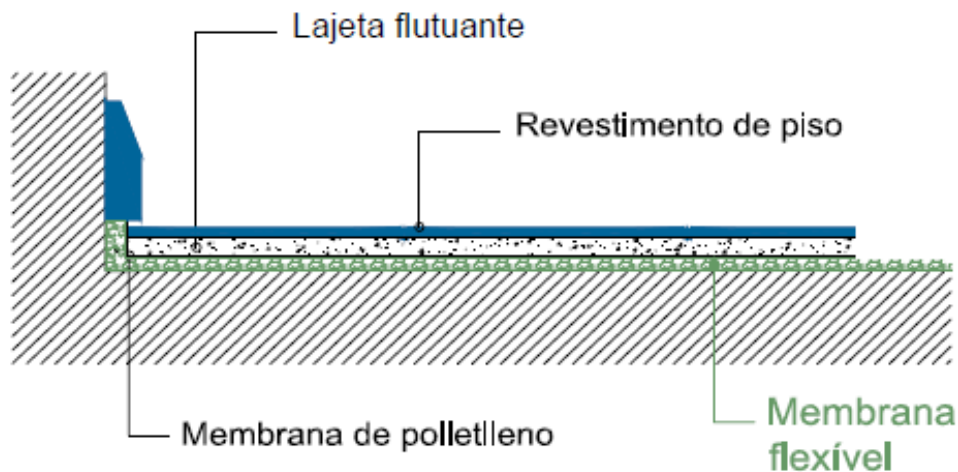


Figura 4.2 - Esquema de uma laje flutuante [45]

Este sistema é constituído por uma lajeta de distribuição que é colocada sobre a laje estrutural mas separada por uma fina camada de material resiliente, como lã de rocha ou lã de vidro, fibras vegetais de madeira ou coco, poliestirenos expandidos elastificados, aglomerados de cortiça ou espumas de

polietileno entre outros, devendo a escolha do material ser adaptada às exigências funcionais pretendidas. Esta solução é capaz de aumentar entre 20 a 30 dB o isolamento a ruídos de percussão. [1]

O valor da eficácia da laje flutuante ( $\Delta L$ ) pode ser calculada através de:

$$\Delta L \approx 30 \log\left(\frac{f}{f_0}\right) \quad (4.3)$$

Em que:

- $f_0$  representa a frequência de ressonância do sistema (Hz) e é calculado de acordo com 4.4.

$$f_0 = \frac{500}{\pi} \sqrt{\frac{s'}{M_q}} \approx 160 \sqrt{\frac{s'}{M_q}} \quad (4.4)$$

Sendo:

- $s'$  rigidez dinâmica da camada resiliente ( $\text{MN/m}^3$ );
- $M_q$  massa superficial da laje flutuante ( $\text{kg/m}^2$ ).

#### 4.1.3. PAVIMENTO FLUTUANTE

Os pavimentos flutuantes são caracterizados por possuírem uma camada resiliente entre a laje de suporte e o revestimento de piso. A camada resiliente para pavimentos flutuantes pode ser constituída pelos mesmos materiais que as camadas resilientes para lajes flutuantes anteriormente enunciados.

De facto o sistema de laje flutuante e de pavimento flutuante são bastante parecidos diferindo principalmente na material colocado acima da camada resiliente. Enquanto no piso flutuante apenas é colocado o revestimento de piso, na laje flutuante é colocada uma lajeta de distribuição e apenas depois o revestimento de piso.

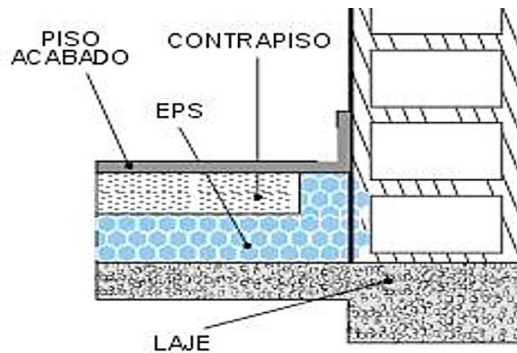


Figura 4.3 - Esquema de pavimento flutuante (adaptado de [46])

A eficácia de um pavimento flutuante ( $\Delta L$ ) pode ser calculada através de:

$$\Delta L = 40 \log\left(\frac{f}{f_0}\right) \quad (4.5)$$

$$f_0 = \frac{500}{\pi} \sqrt{\frac{s'}{m'}} \approx 160 \sqrt{\frac{s'}{m'}} \quad (4.6)$$

Sendo que:

- $f_0$  representa a frequência de ressonância do sistema (Hz);
- $s'$  representa a rigidez dinâmica da camada resiliente ( $\text{kg/m}^3$ );

- $m'$  representa a massa superficial do revestimento de piso ( $\text{kg/m}^2$ ).

#### 4.1.4. TETO SUSPENSO

Os tetos suspensos (figura 4.4) ou correntemente chamados tetos falsos são atualmente muito utilizados para a passagem de instalações técnicas, no entanto também podem ser uma boa solução para proceder ao isolamento sonoro a ruídos de percussão, sendo que para isso o teto falso deverá conter material absorvente no tardo da caixa-de-ar e ser suspenso através de suspensores anti vibratórios. Embora esta não seja a solução de maior eficácia no controlo de ruídos de percussão, este tipo de solução construtiva é muito benéfica por ser a menos intrusiva passível de utilizar em edifícios já construídos.

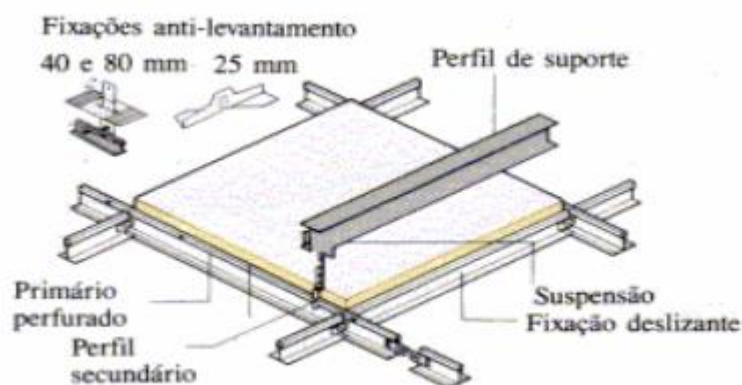
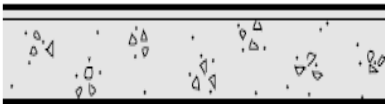


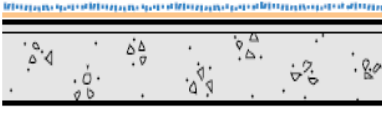
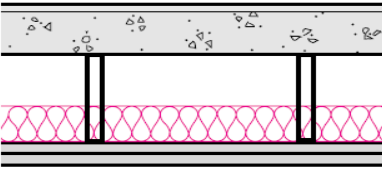
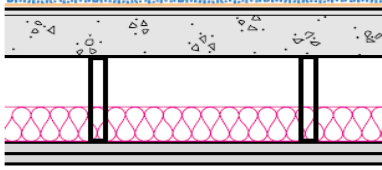
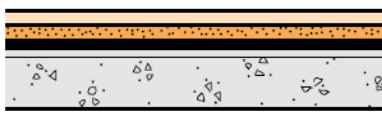
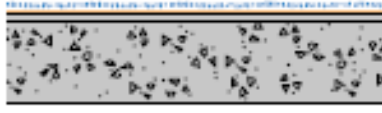
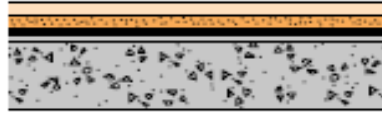
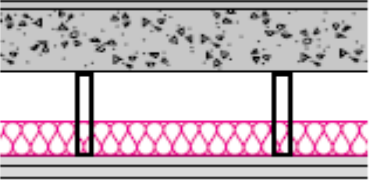
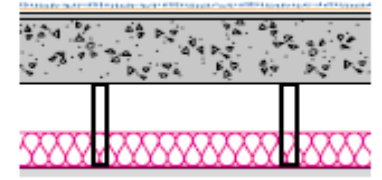
Figura 4.4 - Exemplo de um teto suspenso [47]

## 4.2. ISOLAMENTO SONORO A RUÍDOS DE PERCUSSÃO DE ALGUMAS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS

Depois de enunciar as principais formas de redução de transmissão de ruídos de percussão torna-se interessante comparar a sua utilização com soluções construtivas mais simples e com pior isolamento sonoro a ruídos de percussão. Assim apresenta-se no quadro 4.1 uma lista de diversas soluções construtivas e a seu isolamento sonoro a ruídos de percussão medido em laboratório ( $L_{n,w}$ ).

Quadro 4.1 - Soluções construtivas ligeiras e seus índices de isolamento sonoro a ruídos de percussão (adaptado de [48])

Pavimentos leves de betão				
Descrição da solução construtiva	Representação esquemática	$L_{n,w}$ (dB)	Altura (mm)	$\Delta L_w$ (dB)
1. Pavimento leve de betão ou pavimento aligeirado com vigotas e abobadilhas com camada regularizadora até 50 mm com cerca de 100 $\text{kg/m}^2$ .		90-95	100-150	-

2. Pavimento igual a 1, mas com adição de um revestimento suave de pelo menos 5 mm.		55-60	105-155	35
3. Pavimento igual a 1, mas com teto metálico suspenso de cerca de 240 mm de altura contendo 80-100 mm de lã mineral.		75-80	370-420	15
4. Igual a 3 adicionando um revestimento suave de pelo menos 5 mm.		50-55	375-425	40
5. Igual a 1, mas com pavimento flutuante sob camada resiliente.		55-60	150-200	35
6. Pavimento pesado de betão com pelo menos 365 kg/m³ e com revestimento suave de pelo menos 5 mm.		60-65	150-200	30
7. Igual a 6, mas adicionando um pavimento flutuante sob uma camada resiliente e sem o revestimento suave		55-60	175-230	35
8. Igual a 6, mas retirando revestimento suave e adicionando um teto metálico suspenso de cerca de 240 mm de altura contendo 80-100 mm de lã mineral.		70-75	420-470	20
9. Igual a 8, mas adicionando o revestimento suave de pelo menos 5 mm.		50-55	425-475	40





# 5

## IMPORTÂNCIA DE BOAS CONDIÇÕES ACÚSTICAS EM SALAS DE AULA

### 5.1. IMPORTÂNCIA PARA TODOS OS UTENTES E CONDIÇÕES EXISTENTES

A escola tem um papel fundamental na construção de uma sociedade na medida em que é o espaço que acompanha o crescimento dos indivíduos ao longo das várias fases da sua maturação. É neste ambiente que se aprende e descobre, com a ajuda dos professores, as ferramentas necessárias para a vida adulta. Daqui se entende que este espaço deve ter as condições necessárias ao bom ambiente e conforto dos alunos, professores e restantes funcionários da escola. Este capítulo aborda a necessidade das salas de aula possuírem boas condições acústicas como forma de promover a qualidade do ensino e conforto dos seus utentes.

O ruído nas salas de aula é sem dúvida um dos principais inimigos da aprendizagem nas escolas, sendo por isso talvez o principal inimigo dos professores no seu processo de ensino. O ruído que se faz sentir dentro de uma sala de aula pode ter duas origens diferentes, a primeira resulta do ruído produzido pelos alunos e aí é importante que a sala possua um tempo de reverberação baixo que permita que o ruído se extinga mais rapidamente, a segunda fonte de ruído resulta da transmissão de sons de outros espaços, não só da envolvente da escola (muitas das escolas estão englobadas em centros urbanos onde existe um elevado ruído proveniente das atividades normais de uma cidade), mas também do ruído proveniente de outros espaços do edifício escolar.

Ora é nestas duas fontes de ruído que os projetistas podem e devem atuar de forma a aumentar o conforto escolar, aumentando quer o isolamento sonoro a ruídos aéreos como também o isolamento sonoro a ruídos de percussão e diminuindo o tempo de reverberação.

A qualidade acústica de uma sala de tem como principais descritores o tempo de reverberação, o isolamento sonoro e a perceção da palavra. Estes descritores estão de certa forma relacionados, mas todos devem ser considerados na construção de uma escola.

O tempo de reverberação e perceção da palavra de uma sala de aula tornam-se ainda mais importantes quando se fala de salas de aulas para crianças que por terem um campo lexical reduzido necessitam de ouvir perfeitamente todas as palavras ditas pelo professor para que as possam reter. [49]

Na Alemanha, em 2005 efetuou-se um estudo com o objetivo de conhecer as propriedades acústicas em algumas salas de aula assim como o seu efeito na aprendizagem de crianças que frequentavam a escola primária. Para uma melhor comparação dos dados recolhidos limitaram a amostra de alunos de oito escolas que frequentavam o segundo ano de escolaridade. O tempo de reverberação medido variava

entre 0,4 e 1,1 s, sendo que em três das salas o tempo de reverberação máximo era largamente ultrapassado. Mediu-se também os valores do ruído de fundo que variava consoante as janelas estivessem fechadas (o ruído de fundo era de 30 dB(A)) ou se estivessem abertas (o ruído de fundo subia para 40 dB(A) com máximos de 58 dB(A)). Não se verificando assim perfeitas condições acústicas nestas salas de aula. [50]

Depois de analisadas as condições acústicas das salas de aula a investigação na Alemanha analisou o efeito do ruído nas crianças, tendo-se concluído que crianças sob o efeito do ruído tinham mais dificuldades em soletrar e em reter informações na memória a curto prazo. [50]

Para avaliar as condições acústicas de escolas é necessário efetuar testes acústicos nessa escola. Em Portugal existe uma grande disparidade de qualidade e tipologia construtivas das escolas existentes, pelo era importante efetuar um estudo estatístico das condições acústicas das salas de aula.

Esse estudo foi feito no âmbito do programa de modernização das escolas do ensino secundário que foi efetuado em Portugal, tendo-se efetuado um levantamento experimental das condições acústicas das escolas existentes no país. Devido à elevada heterogeneidade existente entre as escolas analisadas, estas foram divididas em três grupos de acordo com a sua orientação funcional e estilo arquitetónico. O primeiro grupo engloba os estabelecimentos considerados históricos e mais antigos, o segundo grupo engloba estabelecimentos de ensino construídos durante o estado novo e o terceiro grupo engloba os estabelecimentos mais recentes e construídos a partir de 1970. [51]

O estudo mostrou algumas diferenças entre os grupos analisados. Os isolamentos sonoros a ruídos aéreos ( $D_{nT,w}$ ) apresentam, para salas de aula, valores de cerca de 45 dB para o primeiro grupo e valores de cerca de 40 dB para os segundo e terceiro grupos. Isto mostra um melhor isolamento para os edifícios mais antigos anteriores ao estado novo que cumprem os atuais limites legais (RRAE de 2008) ao contrário dos edifícios mais recentes construídos no período do estado novo e anos seguintes. Esta diminuição do isolamento sonoro deve-se muito provavelmente à alteração dos processos construtivos ao longo do tempo que foi determinando uma diminuição da massa dos elementos construtivos. Foram também medidos os valores do isolamento sonoro de fachadas ( $D_{2m,nT,w}$ ) que demonstram a mesma tendência apresentando valores de 30 dB para os edifícios do primeiro grupo, 28 dB para os edifícios do segundo grupo e 26 dB para os edifícios do terceiro grupo. Por fim também foram medidos os valores do tempo de reverberação para os diferentes tipos de salas que mostraram uma evolução diferente dos dois outros parâmetros. O primeiro grupo de salas de aula apresentou valores de tempo de reverberação de cerca de 2,4 s, o segundo grupo apresentou valores de tempo de reverberação de 1,8 s e no terceiro grupo foram medidos valores de cerca de 1,5 s. Houve assim uma evolução positiva da forma de construir salas de aula que foram diminuindo o tempo de reverberação até valores próximos do desejável. [51]

Este estudo mostrou assim que a grande maioria das salas de aula em Portugal não cumpria as condições mínimas de conforto acústico. As obras nas escolas resultantes do programa de modernização implementado melhoraram em muitas escolas o conforto acústico, no entanto este programa apenas abrangeu uma pequena percentagem do número de escolas existentes em Portugal, havendo assim ainda um elevado número de escolas com condições acústicas semelhantes às existentes no estudo mencionado e prejudiciais à aprendizagem dos alunos.

Daqui se conclui que de forma a garantir a igualdade de circunstâncias que todos os alunos têm direito é necessária a atenção e intervenção das entidades competentes.

## **5.2. IMPORTÂNCIA PARA OS ALUNOS**

A aprendizagem de um aluno é algo que embora dependente das aptidões de cada ser humano, depende fortemente das características que a escola possui, entre as quais a mais importante é a qualidade acústica.

O ruído de fundo muitas vezes sentido em salas de aula quando possui um elevado nível de pressão sonora atrapalha ou mesmo impede a comunicação oral e pode trazer consigo alguns malefícios físicos, emocionais e educacionais.

Os ruídos sentidos numa sala de aula podem resultar de diversas fontes que afetam de diferentes formas a comunicação dentro de uma sala de aula, sendo os ruídos localizados no mesmo espectro de frequências que a voz humana os que mais perturbam a aprendizagem na medida em que provoca a redução ou mascaramento das redundâncias acústicas da voz do professor tornando mais difícil ao aluno a clara percepção das palavras do professor.

Ouvir não é o mesmo que escutar uma vez que ouvir significa que as ondas sonoras chegam ao tímpano pondo-o em vibração, no entanto para escutar algo é necessário que esse som que chega ao tímpano seja processado e decodificado pelo cérebro no processo que permite ao ser humano construir o significado daquilo que ouve. Este processo de decodificação da onda sonora depende do campo lexical do ouvinte, razão pela qual as crianças que ainda estão a formar o seu campo lexical têm maior dificuldade de perceber aquilo que ouve pelo que más condições acústicas que alteram ou distorcem o som aumentam esta dificuldade. [52]

É importante referir também que um maior esforço para ouvir e perceber o som diminui a capacidade cognitiva que estaria reservada para outras tarefas, provocando uma alteração na dinâmica da sala de aula e os alunos menos participativos nas atividades escolares. [53]

Outra importante característica das salas de aula é a sua dimensão, uma vez que quanto maior a distância entre o aluno e o professor mais difícil será ao aluno a percepção das palavras do professor, pois o nível sonoro produzido pelo professor vai diminuindo à medida a que a distancia a ele diminui. [52]

De forma a ocorrer uma perfeita compreensão por parte do aluno das palavras do professor o nível sonoro da voz do professor ouvida por parte do aluno deve ser superior em cerca de 10 dB ao nível sonoro do ruído existente na sala. Esta diferença deve ser ainda maior quando se tratam de crianças com idades inferiores a 13 anos devendo a diferença ser de pelo menos 15 dB nestes casos. Ou seja, este ruído afeta a saúde das crianças, pois o aluno precisa despende um esforço maior para se concentrar durante várias horas de aula enquanto o professor terá um esforço redobrado para manter sua voz em intensidade maior para ser ouvido. [54]

Fazendo-se agora uma listagem dos malefícios de más condições acústicas em salas de aula para os alunos pode-se salientar [49]:

- Atraso na aprendizagem;
- Aproveitamento escolar empobrecido;
- Dificuldade de compreensão;
- Dificuldade de atenção;
- Dificuldade de aprender a ler;
- Diminuição da capacidade de concentração;
- Exaustão;
- Aumento da frequência cardíaca;
- Desinteresse pelas aulas.

Estas dificuldades enunciadas tornam-se ainda mais importantes e significativas quando os alunos apresentam perda auditiva, problemas de aprendizagem, alteração do processamento auditivo ou retardamento de desenvolvimento. Se inseridos em salas de aula de fraca qualidade acústica uma aprendizagem eficaz por parte destes alunos será praticamente impossível.

### 5.3. IMPORTÂNCIA PARA OS PROFESSORES

A acústica de uma sala de aula é um dos principais aliados ou opositores de um professor pois para além de a acústica ter um grande efeito na qualidade de ensino que o professor pode conseguir, esta área pode também ser responsável pela saúde do professor. [55]

Uma das principais ferramentas de trabalho de um professor é a voz pelo que para que o professor possa ser capaz de efetuar o seu trabalho necessita que a sua voz esteja saudável. Ora o ruído tem consequências muito prejudiciais para a voz de quem tenta comunicar num local barulhento este facto é comprovado pelo *Lombard effect* (tendência involuntária para elevar o volume da voz aquando da presença num local ruidoso). Isto torna a profissão de professor como mais propensa a ter problemas de voz quando comparada com outras profissões. [56]

Um estudo realizado nos Estados Unidos da América procurou identificar a relação entre os problemas de voz apresentados por professores e por outras profissões em geral, procedendo para isso a uma entrevista telefónica usando um questionário de problemas na voz a 2531 pessoas, 1243 das quais eram professores e 1288 desempenhavam outras profissões. Vários conjuntos de dados foram analisados e suportaram conclusões curiosas. A existência de problemas de voz no momento da entrevista era bastante superior na amostra de professores que apresentava valores de 11,0% enquanto apenas 6,2% (quase metade) dos não professores apresentava problemas. Os professores apresentavam também uma muito maior percentagem de ocorrência de problemas de voz durante a sua vida, 57,7% nos professores e 28,8% nos não professores. Conclui-se também que as mulheres apresentavam maior percentagem de ocorrência de problemas de voz que os homens, 46,3% contra 36,9%. As mulheres apresentam também maior percentagem de ocorrência de problemas crónicos de voz (duração superior a 4 semanas) apresentando valores 20,9% contra 13,3% dos homens. [57]

Através deste estudo foi possível reunir informação que suporta a ideia que o grupo de risco incide sobre professores do sexo feminino com idades compreendidas entre 40 e 59 anos e que têm, no seu passado familiar, antepassados com incidência de problemas de voz.

Convém então efetuar uma síntese dos malefícios que o ruído pode ter para os professores [58]

- Dores de garganta;
- Rouquidão;
- Maior incidência de doenças relacionadas com a voz;
- Enfraquecimento da voz ao longo do dia;
- Falhas na voz;
- Afonia;
- Dores de cabeça;
- Fadiga;
- Desmotivação.

Por todas estas razões pensa-se que a possibilidade de todos estes malefícios para professores e aluno não podem ser ignoradas e boas condições acústicas devem ser uma exigência de todas as salas de aula.

# 6

## LEGISLAÇÃO

### 6.1. LEGISLAÇÃO PORTUGUESA

A crescente preocupação com a acústica dos edifícios criou a necessidade de impor limites a parâmetros acústicos que cada tipo de construção deve respeitar de forma preservar a atividade aí desenvolvida. Em Portugal a primeira legislação sobre acústica surge em 1983 [59] nos Açores e teve como objetivo controlar o ruído na vizinhança de edifícios hospitalares e escolares.

Era necessário, no entanto, a produção de um documento que vigorasse em todo o país e assim em 1987 surge em Portugal o “Regulamento Geral sobre o Ruído”, pelo decreto-lei 251/87 [60].

O decreto-lei 129/2002 de 11 de Maio, aprovou o “Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios” (RRAE) [24], que regula a vertente do conforto acústico no âmbito do regime da edificação, contribuindo para a melhoria da qualidade do ambiente acústico e para o bem-estar e saúde das populações, em articulação com o regime jurídico relativo ao ruído ambiente.

Depois de algumas alterações a este último documento, surge em 2008 o atual decreto-lei 96/2008 [23] que compatibiliza o anterior regulamento com as normas europeias que entretanto foram criadas.

De forma a analisar apenas o tema deste trabalho apresentam-se os limites fixados pelos mais importantes regulamentos portugueses que são o RGR de 1987 [60], o RRAE de 2002 [24] e o RRAE de 2008 [23].

É importante referir que a forma de calcular o isolamento sonoro a ruídos de percussão, assim como a designação dos índices foi sendo alterada ao longo das sucessivas atualizações dos regulamentos.

No RGR de 1987 [60] o índice utilizado na avaliação dos ruídos de percussão era o índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão  $L_p$ . O índice corresponde ao valor da ordenada da curva de referência nos 500 Hz após o ajuste da curva do nível de pressão sonora normalizada ( $L_{pn}$ ) à curva de referência. Este processo é igual ao descrito nas normas atuais sendo que deve ser feito utilizando bandas de 1/1 oitava.

O valor de  $L_{pn}$  pode ser calculado através de:

$$L_{pn} = L_p - 10\log(A_0/A) \quad (6.1)$$

Sendo,

- $L_{pn}$  - isolamento sonoro normalizado a ruídos de percussão, em dB/oitava;
- $L_p$  - isolamento sonoro efetivo a ruídos de percussão, em dB/oitava;
- $A$  - área de absorção sonora efetiva do local recetor  $m^2$ ;
- $A_0$  - área de absorção sonora de referência ( $10 m^2$ ).

No RRAE de 2002 [24] o índice utilizado era o índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão normalizado ( $L'_{n,w}$ ) para uma área de referência ( $A_0$ ) de 10 m<sup>2</sup> do compartimento recetor. No RRAE de 2008 [23] o parâmetro utilizado era o índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão ( $L'_{nT,w}$ ) padronizado para um tempo de reverberação do compartimento recetor ( $T_0$ ) que normalmente toma o valor de 0,5 s. Os valores limite são os apresentados no quadro 6.1.

Quadro 6.1 - Valores limite de isolamento a ruídos de percussão segundo legislação Portuguesa (adaptado de [23], [24] e [60])

Regulamento	RGR 1997	RRAE 2002	RRAE 2008
Índice utilizado	$I_p \leq$	$L'_{n,w} \leq$	$L'_{nT,w} \leq$
Limite legal para escolas	70 dB/oit.	65 dB (em condições gerais)	65 dB (em condições gerais)
		60 dB (se emissor for corredor, ginásio, oficina ou refeitório)	60 dB (se emissor for corredor, ginásio, oficina ou refeitório)

Para a medição do tempo de reverberação dos locais a seguir referidos estes são considerados mobilados normalmente e sem ocupação e o TR corresponde à média aritmética dos valores obtidos para as bandas de oitava centradas nas frequências de 500, 1000 e 2000 Hz. Os valores limite estão no quadro 6.2.

Quadro 6.2 - Limite do tempo de reverberação segundo RRAE de 2008 [23]

Locais	Tempo de reverberação
Salas de aula, bibliotecas, salas polivalentes e refeitórios.	$TR \leq 0,15V^{1/3}$ V- volume do compartimento em causa

## 6.2. LEGISLAÇÃO ESTRANGEIRA

Neste subcapítulo são apresentados os valores dos parâmetros utilizados em alguns outros países para definir o isolamento sonoro a ruídos de percussão de forma a ser possível uma comparação com os limites da legislação Portuguesa. Os outros parâmetros descritos nessas legislações não são aqui analisados, uma vez que não pertencem ao âmbito deste trabalho.

Em Espanha as regras a cumprir pelos edifícios do ponto de vista acústico estão definidas no “*DB-HR Proteccion frente al ruido*” aprovado pelo Real Decreto 1371/2007 [61], de 19 de Outubro. Segundo este documento o ruído de percussão é medido pelo *nível global de presión de ruido de impacto*, com significado semelhante ao índice português  $L'_{nT,w}$ .

O índice espanhol pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$L'_{nT,w} = L'_{n,w} - 10\log(0,32V) \quad (6.2)$$

Sendo que:

- $L'_{nT,w}$  – nível global de ruídos de impacto padronizado (dB);
- $L'_{n,w}$  – nível global de ruídos de impacto normalizado (dB);
- V – volume do recinto recetor (m<sup>3</sup>).

A forma de calcular o índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão em Espanha é assim igual à forma utilizada em Portugal.

Os limites dados pelo regulamento para o *nível global de presión de ruido de impacto* ( $L'_{nT,w}$ ) são:

- $L'_{nT,w} \leq 65$  dB em espaços protegidos (as escolas são considerados espaços protegidos);
- $L'_{nT,w} \leq 60$  dB em espaços habitacionais.

No Reino Unido foi publicado em 1 de Janeiro de 2003 o *Building Bulletin* 93 (BB 93) [62], que apesar de pequenas alterações, se mantém atualmente em vigor. Este documento descreve os parâmetros acústicos em escolas sendo de carácter obrigatório e teve a sua mais recente atualização publicada em 18 de Dezembro de 2014.

Os valores dos requisitos de transmissão de ruídos de percussão são dados pelo parâmetro *weighted standardised impact sound pressure level* ( $L'_{nT,w}$ ). Este parâmetro é medido de acordo com a norma EN ISO 140-7 [63]. No quadro 6.3 estão indicados alguns dos limites máximos de  $L'_{nT,w}$  que são dados de acordo com o tipo de ocupação do compartimento recetor e de acordo com o tipo de intervenção (construção nova ou reabilitação) a efetuar.

Quadro 6.3 - Valores máximos de  $L'_{nT,w}$  permitidos no Reino Unido (adaptado de [62])

Tipo de ocupação do compartimento recetor	Valor máximo de $L'_{nT,w}$ (dB)	
	Salas de aula novas	Salas de aula reabilitadas
<b>Salas de aula direccionadas para o ensino de alunos com dificuldades auditivas ou dificuldades de comunicação</b>	55	60
<b>Salas de música</b>	55	60
<b>Bibliotecas</b>	60	65
<b>Salas de aula normais</b>	60	65
<b>Corredores</b>	65	65

Nos EUA desde a década de 1990 que a *Acoustical Society of America* vem desenvolvendo esforços no sentido de melhorar a qualidade acústica das salas de aula americanas. Atualmente está em vigor o *American National Standard Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools* de 2010 [64] onde estão descritos os principais parâmetros a cumprir por parte de todas as escolas americanas.

Nos EUA o isolamento sonoro a ruídos de percussão é avaliado pelo parâmetro IIC (*impact insulation class*). Este parâmetro deve ser medido em laboratório de acordo com a norma ASTM E492 [28] e calculado de acordo com a forma de cálculo norma ASTM E989 [27].

Os valores mínimos de IIC que alguns espaços de uma escola devem cumprir estão indicados no quadro 6.4.

Quadro 6.4 - Valores mínimos de IIC a cumprir pelas escolas nos EUA (adaptado de [64])

<b>Tipo de ocupação do compartimento recetor</b>	<b>Valor mínimo de IIC</b>
<b>Salas de aula normais</b>	45
<b>Salas auxiliares</b>	40
<b>Salas com volume até 566 m<sup>3</sup> situadas sob um estúdio de dança, ginásio ou salas semelhantes de elevada frequência de impactos no piso</b>	70
<b>Salas com volume superior a 566 m<sup>3</sup> situadas sob um estúdio de dança, ginásio ou salas semelhantes de elevada frequência de impactos no piso</b>	65
<b>Salas auxiliares situadas sob um estúdio de dança, ginásio ou salas semelhantes de elevada frequência de impactos no piso</b>	65

Os valores anteriores devem ser cumpridos apenas pelo pavimento utilizado, uma vez que a medição deve ser feita sem a inclusão de possíveis revestimentos de piso tais como alcatifas.

Nas medições efetuadas *in situ* calcula-se o índice AIIC (*apparent impact insulation class*), que deve ser medido de acordo com a norma ASTM E1007 [65] e que é vulgarmente chamado de *field impact insulation class* (FIIC). Na verificação do cumprimento do regulamento considera-se que valores de AIIC até 5 pontos mais baixos que IIC cumprem as exigências.

Em França está em vigor o decreto de 25 de Abril de 2003 [66] que define requisitos acústicos para edifícios educacionais. O índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão utilizado é o  $L'_{nT,w}$  medido e calculado tal como na legislação Portuguesa e os seus limites são dados pelo quadro 6.5.

Quadro 6.5 - Valores máximos de  $L'_{nT,w}$  admitidos nas escolas de França (adaptado de [44])

<b>Tipo de ocupação do compartimento emissor</b>	<b>Valor máximo de <math>L'_{nT,w}</math> (dB) verificado na sala de aula recetora</b>
<b>Pavilhão desportivo</b>	45
<b>Pavilhão desportivo de um jardim-de-infância</b>	55
<b>Qualquer outro espaço da escola</b>	60

Na Suécia foi implementada em 2007 a norma SS 25268 [67] onde são especificados os requisitos que devem ser utilizados e limites a serem usados na avaliação do isolamento sonoro a ruídos de percussão, entre outros parâmetros acústicos. Esta norma veio complementar a norma já existente que servia apenas para alguns tipos de edifícios, passando com esta nova norma a legislação sueca a regulamentar escolas, hotéis, instituições de saúde, entre outras. Para cada tipo de edifício analisado são apresentados classes de valores em função da sua qualidade acústica. A classe varia de A a D, sendo a classe A a de melhor qualidade acústica e a D a de pior. Neste trabalho apenas se analisará a classe C que é a classe mínima que as novas construções devem satisfazer.



A legislação para salas de aula obriga a que o isolamento sonoro a ruídos de percussão cumpra os seguintes dois requisitos:

- $L'_{n,w} \leq 56$  dB;
- $L'_{n,w} + C_{1,50-2500} \leq 60$  dB.

As normas suecas possuem ainda uma regra adicional no cálculo do isolamento sonoro a ruídos de percussão que indica o valor de  $31 \text{ m}^3$  como volume máximo da sala recetora passível de analisar. Nos casos em que o volume da sala recetora é superior a este limite deve-se utilizar  $L'_{n,w} = L'_{nT,w}$  ou seja deve-se utilizar o valor do índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão padronizado para um tempo de reverberação de referência ( $T_0$ ) de 0,5 s em vez do índice normalizado para uma área de referência de  $10 \text{ m}^2$ . Esta é uma prática normal nos países nórdicos, visto que na Noruega para volumes superiores a  $100 \text{ m}^3$  utiliza-se  $L'_{n,w} = L'_{nT,w} + 5$  dB. Na Finlândia para volumes superiores a  $60 \text{ m}^3$  utiliza-se  $L'_{n,w} = L'_{nT,w} + 3$  dB. [68]

Apresenta-se a seguir no quadro 6.6 a comparação dos limites regulamentares de isolamento sonoro a ruídos de percussão admitidos para salas de aula nos diferentes países.

Quadro 6.6 - Comparação dos limites regulamentares do isolamento sonoro a ruídos de percussão entre salas de aula em diferentes países

Países e respetiva regulamentação	Gama de frequências analisadas (Hz)	Limite normativo (dB)
Portugal / RRAE de 2008	100 - 3150	$L'_{nT,w} \leq 65$
Espanha / DB-HR de 2007	100 - 3150	$L'_{nT,w} \leq 65$
Reino Unido / BB 93 de 2003	100 - 3150	$L'_{nT,w} \leq 60$
EUA / ANSI/ASA S12.60-2010	100 - 3150	$IIC \geq 45$
França / DL 92-1444 de 2003	100 - 3150	$L'_{nT,w} \leq 60$
Suécia / SS 25267 de 2007	50 - 3150	$L'_{n,w} \leq 56$
		$L'_{n,w} + C_{1, 50-2500} \leq 56$
Itália / DPCM de 5/12/1997	100 - 3150	$L'_{n,w} \leq 58$
Noruega / NS 8175 de 2008	100 - 3150	$L'_{n,w} \leq 53$
Finlândia / SFS 5907 de 2004	100 - 3150	$L'_{n,w} \leq 53$
Austrália / AS/NZS 2107 de 2000	100 – 3150	$L'_{nT,w} \leq 55$



# 7

## CASO DE ESTUDO – SALAS DE AULA DA FEUP

### 7.1. DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO E ESPAÇOS ANALISADOS

De forma a fazer um estudo aprofundado da transmissão de ruídos de percussão foram utilizadas as salas de aula da FEUP como caso de estudo para a realização de medições. As instalações de FEUP foram inauguradas em 22 de Março de 2001 e são divididas em diferentes blocos que contemplam diferentes utilizações (figura 7.1). Para a realização deste trabalho apenas se utilizou o bloco B, local onde ocorrem a quase totalidade de aulas da faculdade.

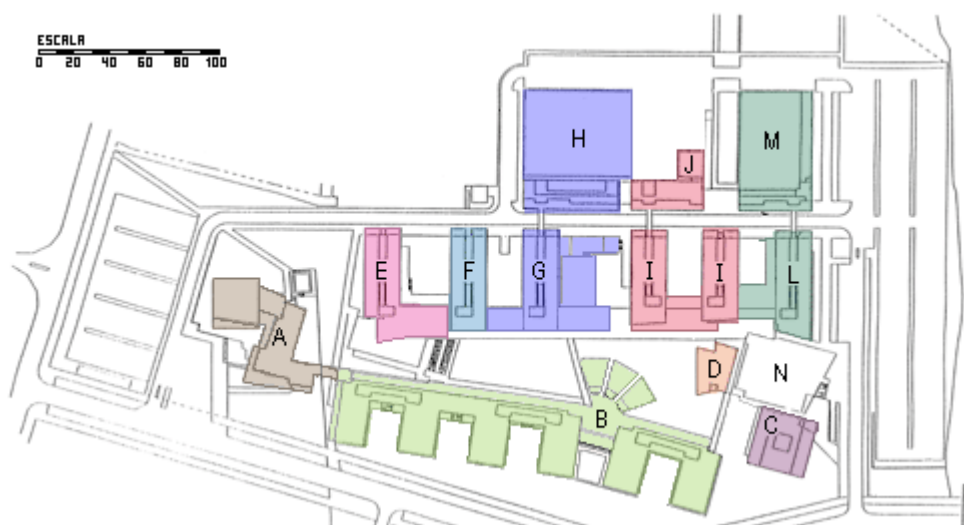





Figura 7.1 - Planta da FEUP [69]

As salas neste bloco são numeradas através de três algarismos que precedem a letra B que designa o bloco em questão. O primeiro algarismo representa o piso em que se encontra a sala e que toma valores de 0 a 3. O segundo e terceiros algarismos representam a ordenação das salas ao longo de cada piso.

As lajes separadoras das salas de aula são todas do mesmo tipo, sendo o revestimento de piso também igual em todos os casos analisados. As lajes são pré-esforçadas de betão, os revestimentos de piso são em linóleo e existem tetos suspensos sem a inclusão de qualquer tipo de material absorvente sonoro.

No quadro 7.1 é feita uma breve descrição das salas de aula utilizadas para a realização das medições. Algumas das salas serão utilizadas como espaço emissor enquanto a sala que se encontra imediatamente por baixo desta será utilizada como espaço recetor. Nas primeiras será utilizada a máquina de percussão enquanto nas segundas se irá medir através de um sonómetro o nível de pressão sonora resultante da ação da máquina de percussão.

Quadro 7.1 - Descrição das principais características das salas de aula da FEUP ensaiadas [Fotos do autor]

Sala	Comp. (m)	Largura (m)	Altura média (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	Fotografia
B 017 (Sala recetora)	14,31	6,92	3,52	99	349	
B 016 (Sala recetora)	9,86	6,93	3,00	68	205	
B 109 (Sala recetora)	7,85	6,94	2,64	54	144	

B 111      8,30      6,93      2,64      58      152  
(Sala emissora)



B 215      22,9      6,96      2,73      159      435  
(Sala emissora e recetora)



B 216      7,60      6,92      2,73      53      144  
(Sala recetora)



B 218      13,96      6,93      2,63      97      254  
(Sala emissora)



---

B 317	7,05	6,93	2,73	49	133
(Sala emissora)					

---



---

B 319	7,55	6,92	2,73	52	143
(Sala emissora)					

---



## 7.2. METODOLOGIA

### 7.2.1. EQUIPAMENTOS

Para efetuar um correto cálculo do isolamento sonoro a ruídos de percussão entre as salas de aula da FEUP foi necessário medir diversos parâmetros que exigiram a utilização de alguns equipamentos que aqui são descritos.

De forma a efetuar a medição das dimensões das salas foi utilizado um medidor digital *DLE50 PROFESSIONAL* da *BOSCH* (figura 7.2).

Na determinação do isolamento de ruídos de percussão foi utilizada uma máquina de impactos normalizada *Brüel & Kjaer* modelo 3204 (figura 7.3) e um sonómetro *Brüel & Kjaer* modelo 2260 (figura 7.4) apoiado num tripé.

De forma a proceder à determinação do tempo de reverberação das salas receptoras foi utilizado o mesmo sonómetro *Brüel & Kjaer* modelo 2260 e uma fonte sonora *Brüel & Kjaer* modelo 4224 (figura 7.5).



Figura 7.2 - Medidor digital *DLE 50 PROFESSIONAL* da *BOSCH* [Foto do autor]



Figura 7.3 - (esquerda) Máquina de impactos *Brüel & Kjaer* modelo 3204 [Foto do autor]



Figura 7.4 - (direita) Sonómetro *Brüel & Kjaer* modelo 2260 [Foto do autor]



Figura 7.5 - Fonte sonora *Brüel & Kjaer* modelo 4224 [Foto do autor]

#### 7.2.2. PROCEDIMENTOS

Os procedimentos adotados na realização das medições seguiram as recomendações e exigências expressas na norma NP EN ISO 140-7 [21].

A medição do ruído de fundo foi feita no dia 24 de Abril de 2015 entre as 20 e as 23 h, sendo que se efetuaram as medições num período de tempo em que a faculdade se encontrava praticamente vazia devido à hora tardia. O ruído de fundo foi medido em todas as salas utilizadas como recetoras, tendo-se obtido os valores para as bandas dos 16 aos 16000 Hz.



A medição do tempo de reverberação foi feita em bandas de 1/3 de oitava dos 50 aos 10000 Hz.

As medições dos níveis sonoros foram feitas em bandas de terço de oitava conforme recomendado na norma anteriormente referida. Na produção do campo sonoro através da máquina de percussão foram utilizadas quatro posições diferentes distribuídas pelo pavimento e que se distribuem dimensionalmente conforme representado na figura 7.6. Foram utilizadas também quatro posições distintas de microfones que correspondem sensivelmente às mesmas posições no espaço que a máquina de percussão ocupava no piso superior.

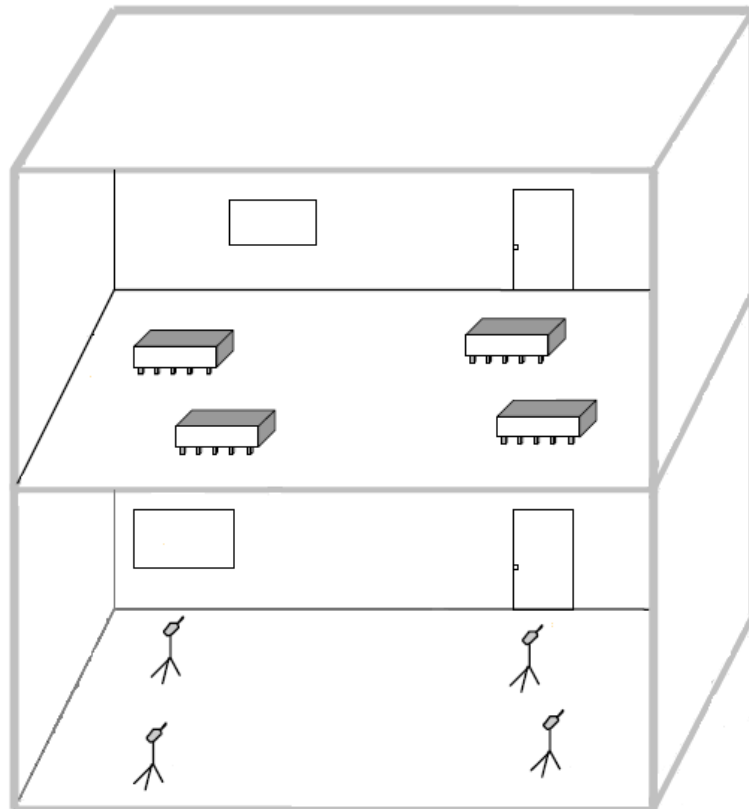


Figura 7.6 - Disposição das diferentes posições da máquina de percussão na sala padrão

Assim, mediram-se um total de 16 valores para cada banda de 1/3 de oitava de níveis de pressão sonora resultantes das combinações possíveis de localização de microfone e máquina de percussão. Foi feita uma média energética (designada de  $L_{\text{médio}}$ ) dos 16 valores obtidos em cada banda de terço de oitava.

Em seguida utilizaram-se as medições do ruído de fundo para subtrair energeticamente a  $L_{\text{médio}}$  de forma a obter  $L_{\text{médio}}$  corrigido, ou seja obter o nível de pressão sonora do compartimento recetor corrigido.

De forma a calcular os valores padronizados e normalizados do isolamento a ruídos de percussão foi utilizado o tempo de reverberação (o equipamento utilizado mediu o tempo que o nível de pressão sonora decaí 30 dB e automaticamente calculou por extrapolação o tempo de decaimento do nível sonoro correspondente a 60 dB).



Por fim foi feito o ajuste da curva medida à curva de referência de modo a obter o valor final do isolamento sonoro a ruídos de percussão normalizado/padronizado e ajustado à curva de referência da NP EN ISO 717-2 [25].

### 7.3. Resultados obtidos

#### 7.3.1. ÍNDICE DE CASOS ESTUDADOS

No estudo efetuado procurou-se escolher lajes que separassem salas de diferentes volumes e características pelo que se apresenta no quadro 7.2 uma síntese dos casos analisados (os casos serão numerados para uma mais fácil identificação) assim como as características mais importante que diferem de caso para caso como é o volume do compartimento recetor e o tempo de reverberação.

Quadro 7.2 - Resumo dos casos a analisar nos ensaios efetuados

Casos	Sala emissora	Sala recetora	Volume da sala recetora (m <sup>3</sup> )	Tempo de reverberação médio 500–2000 Hz (s)
<b>Caso 1</b>	B 218	B 017	349	2,3
<b>Caso 2</b>	B 111	B 016	205	1,7
<b>Caso 3</b>	B 215	B 109	144	2,1
<b>Caso 4</b>	B 317	B 215	435	2,2
<b>Caso 5</b>	B 319	B 216	144	1,8

#### 7.3.2. CASO 1 (EMISSOR B 218 E RECETOR B 017)

Apresentam-se nos quadros 7.3 e 7.4 todos os valores medidos nos ensaios assim como os cálculos necessários de forma a calcular os valores de  $L'_{n,w}$  e  $L'_{nT,w}$  na transmissão de ruídos de percussão da sala B 218 para a sala B 017. Neste caso efetuou-se a medição entre uma sala de aulas média com volume de 254 m<sup>3</sup> e um anfiteatro grande com volume de 349 m<sup>3</sup>.

De referir que nestes cálculos foram utilizadas as curvas de referência (CR) e desvios ( $\Delta$ ) com o índice 1 para o cálculo de  $L'_{n,w}$  e as curvas de referência e desvios com índice 2 foram utilizados no cálculo do valor de  $L'_{nT,w}$ .

Quadro 7.3 - Valores medidos na sala B017 (sala recetora)

Freq. (Hz)	Li1 (dB)	Li2 (dB)	Li3 (dB)	Li4 (dB)	Li5 (dB)	Li6 (dB)	Li7 (dB)	Li8 (dB)	Li9 (dB)	Li10 (dB)	Li11 (dB)	Li12 (dB)	Li13 (dB)	Li14 (dB)
<b>50</b>	58,9	58,7	55,3	62,1	60,2	61,2	57,7	59,9	56,2	50,4	55,9	62,4	56,5	59,6
<b>63</b>	49,0	45,8	48,4	54,0	51,6	54,9	51,9	52,2	52,7	49,2	48,8	54,7	50,2	53,7
<b>80</b>	48,7	49,7	51,7	50,6	51,3	50,7	55,1	49,5	47,7	47,8	50,2	53,7	47,7	47,7
<b>100</b>	49,2	51,2	52,1	50,0	50,0	50,3	51,8	49,0	46,3	50,3	47,5	53,8	50,3	52,0
<b>125</b>	53,1	54,5	51,4	52,5	49,2	49,3	51,8	50,0	53,3	54,2	52,8	55,1	49,3	51,9
<b>160</b>	54,6	51,7	51,1	49,6	50,8	52,6	52,5	52,7	51,7	51,0	50,4	52,3	49,9	50,7
<b>200</b>	54,7	53,4	52,4	51,8	51,5	51,3	53,7	52,7	53,3	52,4	52,5	53,8	52,6	52,9
<b>250</b>	52,7	53,6	52,9	54,5	53,3	53,4	54,2	52,2	52,8	52,5	53,9	53,5	54,0	53,7

<b>315</b>	55,6	54,8	54,8	54,6	53,7	53,4	53,6	53,1	54,1	55,7	55,4	55,2	54,3	55,2
<b>400</b>	57,9	58,3	57,1	58,5	58,1	58,8	58,5	57,8	57,7	56,8	56,2	56,3	56,8	57,1
<b>500</b>	56,8	59,6	56,7	56,4	55,6	57,1	57,4	57,8	55,5	56,2	56,4	56,5	57,0	56,2
<b>630</b>	58,6	59,2	58,4	58,6	59,5	59,5	60,6	60,0	57,1	57,3	58,2	58,7	59,6	58,8
<b>800</b>	61,9	62,0	61,0	60,5	61,0	61,4	61,1	62,0	60,9	61,0	61,9	61,3	61,6	60,7
<b>1000</b>	63,6	64,3	62,4	63,5	64,0	64,4	65,5	64,5	61,0	60,8	61,8	61,9	62,9	62,6
<b>1250</b>	64,7	64,7	64,4	64,6	65,3	65,6	66,2	66,2	59,9	60,1	61,4	61,3	64,3	63,5
<b>1600</b>	61,5	60,8	60,7	60,7	61,3	61,1	61,8	61,4	60,3	60,6	61,2	61,5	61,4	61,3
<b>2000</b>	60,6	60,1	60,6	60,3	63,7	64,5	65,5	64,8	62,6	62,8	64,2	63,8	61,6	61,8
<b>2500</b>	59,9	60,3	60,2	60,0	62,2	63,5	63,7	63,9	61,9	62,3	62,9	62,9	59,5	59,2
<b>3150</b>	59,2	59,2	59,1	59,0	61,0	60,5	61,1	61,0	60,7	61,2	62,0	61,6	61,6	61,7
<b>4000</b>	53,5	53,9	53,8	53,3	53,1	53,9	54,9	54,9	51,7	51,9	53,2	53,1	51,9	51,3
<b>5000</b>	43,6	44,0	44,5	43,9	45,4	46,7	47,8	47,5	42,7	43,0	44,5	44,7	44,6	43,7

Quadro 7.4 - Valores medidos e cálculo de  $L'_{n,w}$  (com CR1) /  $L'_{nT,w}$  (com CR2) da sala B017 (CR-curva de referência,  $\Delta$ -desvios e  $L_b$ -Ruído de fundo)

Freq.	$L_{i15}$	$L_{i16}$	$L_{médio}$	$L_b$	$L_{médio}$ corrigido	TR	$L'_n$	$L'_{nT}$	CR 1	CR 2	$\Delta 1$	$\Delta 2$
(Hz)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(s)	(dB)	(dB)				
<b>50</b>	50,0	57,3	58,8	37,9	58,7	2,6	61,9	51,4				
<b>63</b>	48,4	49,5	51,7	32,0	51,6	2,4	55,3	44,8				
<b>80</b>	50,4	48,2	50,6	29,7	50,6	2,1	54,7	44,3				
<b>100</b>	53,1	48,4	50,8	33,3	50,7	2,2	54,7	44,2	74	64	-	-
<b>125</b>	48,8	49,1	52,1	25,6	52,1	2,3	55,9	45,4	74	64	-	-
<b>160</b>	52,6	52,7	51,9	25,1	51,9	2,0	56,2	45,8	74	64	-	-
<b>200</b>	52,4	51,9	52,8	29,2	52,8	2,5	56,4	45,9	74	64	-	-
<b>250</b>	53,3	51,0	53,3	27,8	53,3	2,5	56,9	46,4	74	64	-	-
<b>315</b>	54,3	53,0	54,5	28,1	54,5	2,4	58,2	47,7	74	64	-	-
<b>400</b>	56,1	56,3	57,5	31,3	57,5	2,7	60,6	50,1	73	63	-	-
<b>500</b>	56,1	55,6	56,8	26,1	56,8	2,3	60,7	50,2	72	62	-	-
<b>630</b>	56,4	57,5	58,8	27,8	58,8	2,3	62,5	52,1	71	61	-	-
<b>800</b>	59,9	59,5	61,2	28,5	61,2	2,4	64,9	54,4	70	60	-	-
<b>1000</b>	62,4	61,6	63,2	24,7	63,2	2,3	67,1	56,6	69	59	-	-
<b>1250</b>	61,7	62,9	64,0	23,4	64,0	2,3	67,8	57,3	66	56	1,8	1,3
<b>1600</b>	60,5	61,0	61,1	19,8	61,1	2,4	64,8	54,4	63	53	1,8	1,4
<b>2000</b>	61,6	60,9	62,8	17,8	62,8	2,3	66,7	56,2	60	50	6,7	6,2
<b>2500</b>	58,4	58,9	61,6	15,9	61,6	2,1	65,9	55,4	57	47	8,9	8,4
<b>3150</b>	60,8	61,1	60,8	16,7	60,8	2,1	65,1	54,6	54	44	11,1	10,6
<b>4000</b>	50,4	50,7	53,0	13,8	53,0	2,1	57,3	46,9				
<b>5000</b>	42	43,1	44,8	13,1	44,8	1,9	49,5	39,0				
									$\Sigma \Delta 1/16=$	1,89	$L'_{n,w}=$	<b>72</b>
									$\Sigma \Delta 2/16=$	1,74	$L'_{nT,w}=$	<b>62</b>

## 7.3.3. CASO 2 (EMISSOR B 111 E RECETOR B 016)

Esta segunda situação representa a medição entre uma sala de aula pequena (B111) com volume de 152 m<sup>3</sup> e um anfiteatro pequeno (B016) com volume de 205 m<sup>3</sup>.

Quadro 7.5 - Valores medidos na sala B016 (sala recetora)

Freq. (Hz)	Li <sub>1</sub> (dB)	Li <sub>2</sub> (dB)	Li <sub>3</sub> (dB)	Li <sub>4</sub> (dB)	Li <sub>5</sub> (dB)	Li <sub>6</sub> (dB)	Li <sub>7</sub> (dB)	Li <sub>8</sub> (dB)	Li <sub>9</sub> (dB)	Li <sub>10</sub> (dB)	Li <sub>11</sub> (dB)	Li <sub>12</sub> (dB)	Li <sub>13</sub> (dB)	Li <sub>14</sub> (dB)
50	53,4	52,3	51,3	59,5	56,2	47,1	55,4	51,7	60,1	59,1	53,1	50,8	51,3	62,4
63	50,2	56,6	53,4	53,2	50,8	54,0	56,1	56,7	53,3	56,8	55,1	50,7	54,7	52,2
80	54,5	53,8	51,4	56,7	52,7	57,5	52,7	53,2	54,9	51,7	56,9	52,0	56,5	51,6
100	50,4	50,0	48,1	51,5	51,8	49,4	50,3	49,4	53,0	52,7	48,6	49,3	50,1	52,4
125	48,9	51,3	48,1	50,2	48,9	48,2	52,1	50,4	52,5	56,3	49,9	48,3	49,9	49,8
160	51,2	53,8	49,8	51,2	51,7	50,5	52,5	53,7	53,5	52,7	48,8	49,5	51,9	51,3
200	55,6	52,7	51,7	52,8	55,2	53,5	54,3	55,1	55,6	57,1	52,6	54,4	54,4	53,3
250	54,5	54,8	54,4	55,5	54,8	53,9	54,2	53,2	56,1	56,1	54,4	55,5	52,7	54,4
315	59,8	57,5	57,0	58,2	57,8	57,3	57,3	58,2	58,1	56,7	58,4	57,3	55,8	55,8
400	61,5	59,9	59,9	60,6	60,1	59,8	59,7	59,5	59,8	59,8	57,7	59,3	58,3	57,8
500	59,7	60,9	59,3	60,1	62,7	63,0	61,9	61,2	57,7	59,5	58,3	58,4	58,0	59,5
630	61,2	62,3	62,0	61,9	63,7	62,8	64,0	64,0	58,3	59,0	59,5	58,1	58,6	58,7
800	63,8	64,0	64,6	65,4	63,0	65,6	67,1	67,7	59,4	59,5	59,6	59,4	61,4	60,9
1000	65,5	65,1	65,4	66,2	63,8	66,3	66,1	66,4	59,1	59,0	58,5	58,7	60,0	60,8
1250	65,6	65,4	65,8	66,6	64,3	64,3	64,3	64,5	58,7	58,4	57,6	57,9	62,0	63,0
1600	64,4	64,4	64,8	64,9	63,4	62,9	63,1	63,2	56,5	56,0	55,8	55,8	63,8	66,2
2000	64,5	65,2	65,3	65,2	63,8	64,5	64,3	64,5	60,1	60,0	60,2	59,8	65,4	64,6
2500	65,1	65,1	65,7	66,3	62,9	63,8	63,4	63,6	60,1	60,4	60,5	60,9	63,9	63,8
3150	63,3	63,9	64,2	65,4	60,4	61,4	61,3	61,5	63,7	64,0	63,8	63,9	61,0	61,2
4000	56,7	57,2	57,6	58,7	54,1	55,2	55,2	55,5	58,7	59,3	58,9	59,4	55,9	56,2
5000	46,5	47,5	48,6	49,9	47,8	49,7	49,3	49,9	47,0	48,0	47,7	47,9	47,8	48,7

Quadro 7.6 - Valores medidos e cálculo de  $L'_{n,w}$  (com CR1) /  $L'_{nT,w}$  (com CR2) da sala B016 (CR-curva de referência,  $\Delta$ -desvios e  $L_b$ -Ruído de fundo)

Freq.	Li <sub>15</sub>	Li <sub>16</sub>	L <sub>médio</sub>	L <sub>b</sub>	L <sub>médio</sub> corrigido	TR	L' <sub>n</sub>	L' <sub>nT</sub>	CR 1	CR 2	$\Delta 1$	$\Delta 2$
(Hz)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(s)	(dB)	(dB)				
50	53,9	57,5	56,5	33,5	56,5	2,5	57,7	49,5				
63	57,5	54,5	54,7	34,0	54,6	1,9	57,1	48,9				
80	51,7	53,8	54,4	32,8	54,3	1,7	57,3	49,1				
100	51,3	55,0	51,2	38,6	51,0	1,7	53,8	45,7	75	67	-	-
125	56,3	53,0	51,7	37,2	51,6	2,2	53,3	45,1	75	67	-	-
160	50,8	53,4	51,9	32,8	51,8	1,9	54,2	46,1	75	67	-	-
200	55,1	54,7	54,5	32,8	54,4	1,9	56,8	48,6	75	67	-	-
250	55,8	54,9	54,8	23,7	54,8	1,9	57,2	49,0	75	67	-	-
315	56,6	56,0	57,5	23,7	57,5	1,9	59,9	51,8	75	67	-	-

<b>400</b>	57,5	57,5	59,4	22,7	59,4	1,9	61,8	53,6	74	66	-	-
<b>500</b>	59,7	60,0	60,3	22,7	60,3	1,7	63,1	54,9	73	65	-	-
<b>630</b>	59,2	59,1	61,3	22,2	61,3	1,6	64,5	56,3	72	64	-	-
<b>800</b>	61,7	62,1	63,7	21,2	63,7	1,6	66,7	58,6	71	63	-	-
<b>1000</b>	61,1	61,3	63,7	21,9	63,7	1,6	66,7	58,6	70	62	-	-
<b>1250</b>	63,3	64,3	63,7	21,1	63,7	1,6	66,7	58,6	67	59	-	-
<b>1600</b>	66,6	67,5	63,8	21,1	63,8	1,7	66,6	58,4	64	56	2,6	2,4
<b>2000</b>	64,7	65,0	64,0	17,3	64,0	1,6	67,0	58,9	61	53	6,0	5,9
<b>2500</b>	63,9	64,0	63,7	15,9	63,7	1,5	67,0	58,8	58	50	9,0	8,8
<b>3150</b>	61,3	61,4	62,9	14,6	62,9	1,5	66,2	58,0	55	47	11,2	11,0
<b>4000</b>	56,8	56,7	57,3	15,7	57,3	1,6	60,5	52,3				
<b>5000</b>	49,5	49,8	48,6	12,7	48,6	1,5	52,1	44,0				
									<b>Σ Δ1/16=</b>	1,80	<b>L´n,w=</b>	<b>73</b>
									<b>Σ Δ2/16=</b>	1,76	<b>L´nT,w=</b>	<b>65</b>

#### 7.3.4. CASO 3 (EMISSOR B 215 E RECETOR B 109)

A medição no Caso 3 efetuou-se entre uma sala de exame de grandes dimensões (B215) com um volume de 435 m<sup>3</sup> e uma sala de aula pequena (B109) com volume de 144 m<sup>3</sup>.

Quadro 7.7 - Valores medidos na sala B 109 (sala recetora)

Freq. (Hz)	Li <sub>1</sub> (dB)	Li <sub>2</sub> (dB)	Li <sub>3</sub> (dB)	Li <sub>4</sub> (dB)	Li <sub>5</sub> (dB)	Li <sub>6</sub> (dB)	Li <sub>7</sub> (dB)	Li <sub>8</sub> (dB)	Li <sub>9</sub> (dB)	Li <sub>10</sub> (dB)	Li <sub>11</sub> (dB)	Li <sub>12</sub> (dB)	Li <sub>13</sub> (dB)	Li <sub>14</sub> (dB)
<b>50</b>	56,2	60,8	59,0	64,2	63,5	61,2	60,8	64,3	61,4	61,8	54,0	60,5	56,9	61,3
<b>63</b>	47,6	50,9	55,1	54,4	55,9	56,6	48,4	52,8	54,2	54,8	59,2	62,3	52,7	52,4
<b>80</b>	50,6	51,0	50,9	49,6	51,8	54,7	53,4	53,4	52,6	49,7	52,7	55,6	54,8	49,2
<b>100</b>	47,8	47,2	52,2	49,9	51,2	54,4	51,4	52,0	47,9	50,3	49,2	49,5	53,1	53,1
<b>125</b>	49,8	50,4	51,0	50,3	54,2	55,3	55,8	57,1	55,9	52,6	52,8	55,5	56,5	54,9
<b>160</b>	49,5	52,3	50,7	49,4	55,7	57,2	56,0	57,7	54,7	55,8	56,3	55,1	54,4	55,4
<b>200</b>	52,1	54,2	52,6	53,3	56,1	54,9	56,7	56,6	54,6	57,7	57,5	56,1	53,9	56,4
<b>250</b>	55,1	55,2	54,8	54,7	56,8	56,0	57,0	56,5	56,3	57,4	57,9	56,9	53,9	54,1
<b>315</b>	61,3	61,5	62,8	60,1	62,0	62,9	60,1	62,0	62,6	63,8	63,5	65,9	59,9	61,4
<b>400</b>	64,6	65,6	67,0	66,2	64,7	64,2	64,7	65,5	67,8	70,2	68,7	68,4	65,7	65,0
<b>500</b>	64,3	64,9	64,7	64,7	65,7	66,5	66,9	66,3	67,4	67,2	67,7	68,0	67,1	66,3
<b>630</b>	67,6	67,7	67,1	67,7	65,8	66,9	65,3	67,2	67,5	68,4	68,1	67,4	66,9	68,1
<b>800</b>	70,1	69,8	68,7	69,3	66,8	66,6	68,3	67,3	67,6	68,1	68,2	68,7	68,1	67,9
<b>1000</b>	67,6	68,0	68,4	67,5	64,2	64,5	64,9	64,8	66,6	66,8	68,0	67,4	67,6	67,9
<b>1250</b>	66,9	67,1	66,0	66,6	64,7	63,9	64,5	64,1	64,3	64,2	64,9	64,8	65,7	66,7
<b>1600</b>	64,5	65,2	65,0	64,7	62,6	62,8	63,0	63,1	63,2	63,6	64,2	63,7	64,7	64,3
<b>2000</b>	64,2	64,7	64,6	63,6	61,6	62,4	62,3	62,6	62,2	62,8	62,9	62,3	63,5	63,5
<b>2500</b>	62,7	63,0	63,2	63,2	60,2	60,4	60,4	60,5	60,6	61,0	61,2	61,2	61,5	61,5
<b>3150</b>	60,0	60,4	60,5	60,4	59,0	58,8	59,3	59,4	58,1	58,5	59,3	59,3	57,8	58,2
<b>4000</b>	55,0	55,2	55,1	55,1	53,9	53,9	54,5	54,4	53,3	53,7	55,1	54,9	53,3	54,0
<b>5000</b>	46,0	46,4	47,1	46,7	44,8	44,9	45,5	45,7	45,1	45,6	47,1	46,6	46,6	47,1

Quadro 7.8 - Valores medidos e cálculo de  $L'_{n,w}$  (com CR1) /  $L'_{nT,w}$  (com CR2) da sala B109 (CR-curva de referência,  $\Delta$ -desvios e  $L_b$ -Ruído de fundo)

Freq.	$L_{i15}$	$L_{i16}$	$L_{médio}$	$L_b$	$L_{médio}$ corrigido	TR	$L'_n$	$L'_{nT}$	CR 1	CR 2	$\Delta 1$	$\Delta 2$
(Hz)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(s)	(dB)	(dB)				
50	57,1	62,4	61,2	33,6	61,1	3,9	58,8	52,2				
63	62,2	57,4	56,7	28,3	56,7	2,5	56,4	49,7				
80	55,5	48,1	52,7	28,1	52,7	1,9	53,6	47,0				
100	52,9	51,9	51,3	30,1	51,3	1,9	52,1	45,4	73	66	-	-
125	52,7	52,4	54,2	33,5	54,1	2,6	53,6	47,0	73	66	-	-
160	57,9	56,8	55,4	29,9	55,3	2,5	55,0	48,4	73	66	-	-
200	57,5	56,8	55,8	33,3	55,7	2,3	55,7	49,1	73	66	-	-
250	56,8	56,8	56,2	28,9	56,2	2,2	56,5	49,8	73	66	-	-
315	61,8	63,4	62,5	30,7	62,5	1,9	63,2	56,6	73	66	-	-
400	64,7	64,5	66,5	29,4	66,5	2,2	66,7	60,1	72	65	-	-
500	66,9	66,1	66,4	27,4	66,4	2,1	66,9	60,3	71	64	-	-
630	67,6	67,4	67,4	26,5	67,4	1,9	68,2	61,6	70	63	-	-
800	68,5	68,1	68,4	29,0	68,4	1,7	69,6	62,9	69	62	0,6	0,9
1000	68,0	68,1	67,1	30,2	67,1	1,6	68,8	62,1	68	61	0,8	1,1
1250	66,7	66,9	65,7	26,4	65,7	1,6	67,2	60,6	65	58	2,2	2,6
1600	64,5	64,5	64,1	21,5	64,1	1,7	65,4	58,7	62	55	3,4	3,7
2000	63,4	63,4	63,2	18,1	63,2	1,7	64,4	57,8	59	52	5,4	5,8
2500	61,8	61,5	61,6	16,5	61,6	1,6	63,2	56,6	56	49	7,2	7,6
3150	58,8	59,1	59,3	11,5	59,3	1,6	60,8	54,2	53	46	7,8	8,2
4000	54,4	54,6	54,4	10,9	54,4	1,6	56,0	49,4				
5000	47,7	48,6	46,5	10,0	46,5	1,5	48,4	41,8				
$\Sigma \Delta 1/16=$									1,71	$L'_{n,w}=$	71	
$\Sigma \Delta 2/16=$									1,87	$L'_{nT,w}=$	64	

### 7.3.5. CASO 4 (EMISSOR B 317 E RECETOR B 215)

A medição do Caso 4 realizou-se entre uma sala de estudo pequena (B 317) com volume de 133 m<sup>3</sup> e uma sala de exame grande (B215) com volume de 435 m<sup>3</sup>.

Quadro 7.9 - Valores medidos na sala B 215 (sala recetora)

Freq.	$L_{i1}$	$L_{i2}$	$L_{i3}$	$L_{i4}$	$L_{i5}$	$L_{i6}$	$L_{i7}$	$L_{i8}$	$L_{i9}$	$L_{i10}$	$L_{i11}$	$L_{i12}$	$L_{i13}$	$L_{i14}$
(Hz)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)
50	57,2	61,0	59,0	56,5	60,7	57,3	57,0	55,1	60,2	57,2	58,6	55,5	56,7	58,8
63	53,2	55,8	55,2	57,8	61,1	58,7	57,1	61,1	62,2	58,7	60,6	62,3	59,4	57,5
80	51,7	54,3	51,2	53,0	55,3	54,4	52,3	55,6	52,0	52,6	53,9	54,0	51,5	53,8
100	51,7	50,9	51,3	51,7	52,8	52,8	53,8	54,3	53,0	50,6	52,4	52,4	51,7	50,8
125	51,6	50,2	53,2	51,2	48,7	50,9	50,4	50,7	50,6	50,6	50,1	51,3	51,7	50,5
160	51,7	49,9	52,7	50,0	53,0	53,8	52,6	52,1	54,7	53,7	50,4	51,5	49,6	50,5
200	51,5	50,5	51,0	51,1	51,5	51,0	50,1	49,8	51,1	51,2	49,3	49,9	51,6	49,2

<b>250</b>	52,0	53,4	51,4	53,1	52,3	52,5	52,9	53,4	52,0	51,9	52,2	53,1	52,2	50,8
<b>315</b>	54,5	53,3	54,3	54,2	54,7	55,0	53,8	54,7	55,0	55,4	54,4	54,3	55,8	55,2
<b>400</b>	56,9	56,9	57,5	58,2	56,3	57,2	56,9	56,9	58,8	57,5	56,6	55,9	57,9	57,5
<b>500</b>	55,5	56,3	55,4	56,3	55,3	56,1	57,2	57,4	55,5	56,2	55,0	56,1	54,3	54,9
<b>630</b>	57,3	56,7	56,7	56,4	55,4	56,2	55,2	55,4	57,2	57,8	56,5	56,2	57,8	58,7
<b>800</b>	56,8	56,9	58,1	56,6	56,0	55,5	55,1	54,7	56,6	57,4	56,7	56,3	57,7	59,3
<b>1000</b>	57,8	57,5	59,0	57,9	55,6	55,9	55,2	54,6	57,7	58,4	56,8	56,1	59,3	60,1
<b>1250</b>	56,8	56,6	57,2	56,7	54,0	55,0	53,9	53,9	56,3	56,6	55,0	54,9	61,8	61,0
<b>1600</b>	55,0	55,1	55,4	55,1	53,4	53,5	52,8	52,5	55,1	55,9	54,7	54,2	59,5	58,5
<b>2000</b>	59,1	58,7	59,5	59,3	55,1	55,8	54,8	54,6	58,2	58,2	57,1	56,6	60,2	60,1
<b>2500</b>	58,1	58,1	58,1	58,5	56,3	57,2	56,3	56,3	58,4	58,2	56,8	56,5	60,6	60,1
<b>3150</b>	57,0	57,0	57,7	57,8	56,5	56,2	55,1	54,8	54,2	53,8	51,4	51,0	59,1	59,0
<b>4000</b>	55,4	55,2	55,7	55,9	55,0	55,3	54,6	54,9	48,6	48,9	47,2	46,9	54,2	54,3
<b>5000</b>	45,5	45,3	46,0	45,9	43,6	44,4	43,5	43,2	41,2	41,5	59,2	38,8	44,1	44,4

Quadro 7.10 - Valores medidos e cálculo de  $L'_{n,w}$  (com CR1) /  $L'_{nT,w}$  (com CR2) da sala B215 (CR-curva de referência,  $\Delta$ -desvios e  $L_b$ -Ruído de fundo)

Freq.	$L_{i15}$	$L_{i16}$	$L_{médio}$	$L_b$	$L_{médio}$ corrigido	TR	$L'_n$	$L'_{nT}$	CR 1	CR 2	$\Delta 1$	$\Delta 2$
(Hz)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(s)	(dB)	(dB)				
<b>50</b>	57,6	55,6	58,1	35,8	58,1	4,2	60,3	48,9				
<b>63</b>	54,5	56,7	59,0	32,3	59,0	2,9	62,8	51,3				
<b>80</b>	52,6	52,0	53,3	30,2	53,3	2,1	58,5	47,1				
<b>100</b>	51,9	52,9	52,3	28,4	52,3	2,8	56,2	44,7	71	59	-	-
<b>125</b>	51,1	55,2	51,4	27,3	51,4	3,4	54,4	43,0	71	59	-	-
<b>160</b>	52,0	52,4	52,2	28,5	52,1	3,1	55,6	44,2	71	59	-	-
<b>200</b>	48,9	50,9	50,6	32,5	50,6	2,9	54,4	43,0	71	59	-	-
<b>250</b>	51,2	51,7	52,3	28,1	52,3	2,7	56,4	45,0	71	59	-	-
<b>315</b>	52,9	52,8	54,1	27,0	54,1	2,7	58,3	46,9	71	59	-	-
<b>400</b>	57,4	57,2	57,3	27,7	57,3	2,8	61,3	49,9	70	58	-	-
<b>500</b>	54,0	54,0	55,7	23,9	55,7	2,5	60,1	48,7	69	57	-	-
<b>630</b>	57,4	56,3	56,8	25,2	56,8	2,3	61,6	50,2	68	56	-	-
<b>800</b>	58,1	57,6	57,0	27,5	57,0	2,1	62,2	50,7	67	55	-	-
<b>1000</b>	58,5	58,8	57,7	27,2	57,7	2,0	63,2	51,8	66	54	-	-
<b>1250</b>	59,6	59,9	57,6	25,5	57,6	1,9	63,2	51,7	63	51	0,2	0,7
<b>1600</b>	56,7	57,2	55,7	22,1	55,7	2,1	60,8	49,4	60	48	0,8	1,4
<b>2000</b>	58,3	58,4	58,1	18,1	58,1	2,1	63,2	51,8	57	45	6,2	6,8
<b>2500</b>	59,6	59,7	58,3	13,3	58,3	2,0	63,7	52,3	54	42	9,7	10,3
<b>3150</b>	57,0	57,3	56,5	11,4	56,5	2,0	62,0	50,5	51	39	11,0	11,5
<b>4000</b>	52,0	52,4	53,8	9,2	53,8	2,0	59,3	47,8				
<b>5000</b>	42,6	42,6	48,7	8,2	48,7	1,8	54,6	43,2				
									$\Sigma \Delta 1/16=$	1,74	$L'_{n,w}=$	<b>69</b>
									$\Sigma \Delta 2/16=$	1,92	$L'_{nT,w}=$	<b>57</b>

## 7.3.6. CASO 5 (EMISSOR B 319 E RECETOR B 216)

A medição do Caso 5 foi efetuada entre uma sala de aula pequena (B 319) com volume de 143 m<sup>3</sup> e uma outra sala de aula pequena (B 216) com volume de 144 m<sup>3</sup>.

Quadro 7.11 - Valores medidos na sala B 216 (sala recetora)

Freq. (Hz)	Li <sub>1</sub> (dB)	Li <sub>2</sub> (dB)	Li <sub>3</sub> (dB)	Li <sub>4</sub> (dB)	Li <sub>5</sub> (dB)	Li <sub>6</sub> (dB)	Li <sub>7</sub> (dB)	Li <sub>8</sub> (dB)	Li <sub>9</sub> (dB)	Li <sub>10</sub> (dB)	Li <sub>11</sub> (dB)	Li <sub>12</sub> (dB)	Li <sub>13</sub> (dB)	Li <sub>14</sub> (dB)
50	52,8	58,3	55,6	62,3	54,4	56,7	59,6	56,9	63,0	61,1	60,3	59,0	65,9	63,6
63	54,5	51,5	52,0	54,1	52,0	53,8	54,9	54,5	56,3	53,2	55,5	57,9	57,6	59,3
80	58,1	57,0	54,2	56,7	50,1	56,7	56,3	56,3	58,7	57,9	56,1	59,4	57,3	60,4
100	50,7	52,2	50,6	55,1	53,7	54,8	53,4	52,4	56,6	55,7	53,8	56,8	54,8	55,2
125	49,2	49,1	51,4	48,9	50,8	50,6	51,5	51,6	52,3	51,3	51,7	52,4	52,0	53,5
160	54,8	51,8	51,1	54,7	56,5	55,0	55,4	55,7	54,9	54,0	53,4	55,3	51,0	51,7
200	52,2	52,7	52,7	52,4	52,0	52,1	49,7	53,4	51,1	49,9	52,7	51,3	54,5	52,6
250	53,8	55,4	53,9	53,0	52,4	53,7	54,1	53,8	51,7	54,1	55,6	53,9	53,0	54,8
315	58,2	56,8	56,3	56,1	56,2	56,6	56,4	55,3	56,6	55,0	57,8	56,3	55,9	56,1
400	57,0	58,5	57,9	58,9	57,3	56,9	57,5	56,5	57,6	56,9	57,0	57,3	57,6	56,8
500	56,8	58,3	57,3	58,0	58,7	59,5	57,6	58,6	58,3	58,0	58,1	57,8	57,7	59,9
630	61,7	62,1	61,3	60,4	61,3	61,4	61,9	62,7	58,2	58,7	60,3	60,2	59,1	58,9
800	60,6	60,3	60,5	60,1	61,8	62,1	61,6	61,7	58,9	58,1	57,4	58,3	59,4	59,5
1000	62,1	61,9	61,4	61,4	62,9	62,8	62,4	62,9	58,7	58,9	59,0	59,4	59,1	58,9
1250	58,6	57,8	57,6	58,2	61,9	61,3	62,3	61,8	57,7	58,3	58,1	57,9	57,8	58,0
1600	56,0	56,1	55,7	56,5	56,9	56,9	57,2	57,1	55,9	56,2	55,5	55,7	57,1	57,2
2000	62,4	62,2	62,4	61,6	62,1	61,7	61,5	61,5	60,7	60,9	61,2	61,1	59,7	59,9
2500	63,0	62,5	62,0	61,6	61,1	61,1	61,3	61,7	61,2	61,6	61,3	61,5	63,1	63,7
3150	62,3	62,2	61,9	62,2	59,0	58,8	59,6	59,9	61,3	61,6	61,3	61,6	61,5	61,7
4000	56,3	56,1	55,4	55,4	56,2	56,5	56,1	56,4	58,1	58,2	58,5	58,3	60,8	60,7
5000	47,4	47,3	46,1	45,8	45,4	45,8	46,6	46,7	45,7	45,9	46,1	45,9	47,4	47,2

Quadro 7.12 - Valores medidos e cálculo de  $L'_{n,w}$  (com CR1) /  $L'_{nT,w}$  (com CR2) da sala B216 (CR-curva de referência,  $\Delta$ -desvios e  $L_b$ -Ruído de fundo)

Freq. (Hz)	Li <sub>15</sub> (dB)	Li <sub>16</sub> (dB)	L <sub>médio</sub> (dB)	L <sub>b</sub> (dB)	L <sub>médio</sub> corrigido (dB)	TR (s)	L' <sub>n</sub> (dB)	L' <sub>nT</sub> (dB)	CR 1	CR 2	$\Delta 1$	$\Delta 2$
50	62,9	58,7	60,8	36,5	60,8	3,5	59,0	52,3				
63	56,9	53,7	55,4	29,1	55,4	2,4	55,2	48,6				
80	56,4	55,7	57,2	30,0	57,2	1,7	58,5	51,9				
100	55,6	55,4	54,5	33,8	54,5	2,1	54,9	48,3	70	63	-	-
125	53,8	52,7	51,6	30,5	51,6	2,1	52,1	45,5	70	63	-	-
160	50,9	50,5	54,0	32,3	53,9	2,2	54,1	47,5	70	63	-	-
200	53,9	55,4	52,7	32,0	52,6	2,1	53,0	46,4	70	63	-	-
250	53,7	53,0	53,9	31,0	53,8	2,1	54,2	47,6	70	63	-	-
315	55,3	56,1	56,4	28,2	56,4	2,1	56,7	50,1	70	63	-	-
400	57,6	57,8	57,5	25,7	57,5	2,2	57,7	51,1	69	62	-	-

<b>500</b>	59,4	59,4	58,4	23,0	58,4	2,0	59,0	52,3	68	61	-	-
<b>630</b>	59,6	59,9	60,7	24,0	60,7	1,8	61,8	55,2	67	60	-	-
<b>800</b>	60,2	59,7	60,2	26,0	60,2	1,6	61,7	55,1	66	59	-	-
<b>1000</b>	58,9	58,7	60,9	26,7	60,9	1,6	62,5	55,9	65	58	-	-
<b>1250</b>	57,9	58,1	59,3	24,9	59,3	1,6	60,9	54,3	62	55	-	-
<b>1600</b>	56,7	56,6	56,5	20,1	56,5	1,8	57,7	51,1	59	52	-	-
<b>2000</b>	59,9	59,6	61,3	16,8	61,3	1,8	62,4	55,8	56	49	6,4	6,8
<b>2500</b>	63,4	63,7	62,2	11,9	62,2	1,7	63,6	57,0	53	46	10,6	11,0
<b>3150</b>	61,5	61,4	61,2	10,2	61,2	1,6	62,8	56,2	50	43	12,8	13,2
<b>4000</b>	60,8	60,4	58,2	7,7	58,2	1,6	59,8	53,1				
<b>5000</b>	47,6	47,2	46,6	7,3	46,6	1,5	48,4	41,8				
									<b><math>\Sigma \Delta 1/16=</math></b>	1,86	<b><math>L'_{n,w}=</math></b>	<b>68</b>
									<b><math>\Sigma \Delta 2/16=</math></b>	1,94	<b><math>L'_{nT,w}=</math></b>	<b>61</b>

## 7.4. ANÁLISE DE RESULTADOS

### 7.4.1. ANÁLISE DE CUMPRIMENTO DE REGULAMENTOS PORTUGUESES E INTERNACIONAIS

Nesta análise será estudada a conformidade das salas da FEUP com os regulamentos em vigor em Portugal ao longo dos anos, nomeadamente o RGR de 1987 (que era o regulamento em vigor aquando da construção da faculdade), o RRAE de 2002 e o RRAE de 2008 (regulamento atual). Para isso irá usar-se os valores de  $L'_{nT,w}$  e  $L'_{n,w}$  calculados no subcapítulo anterior aos quais será somado o valor da incerteza que toma o valor de -3 dB. Os valores de  $I_p$  necessários à do cumprimento do RGR de 1987 são calculados no quadro 7.13 e 7.14.

Quadro 7.13 - Valores medidos e cálculo de  $I_p$  dos Casos 1 ao Caso 3 (CR-curva de referência com a mesma numeração do caso em análise,  $\Delta$ -desvios com a mesma numeração do caso em análise)

Frequência (Hz)	Caso 1			Caso 2			Caso 3		
	L <sub>pn</sub> (dB)	CR1	Δ1	L <sub>pn</sub> (dB)	CR2	Δ2	L <sub>pn</sub> (dB)	CR3	Δ3
125	60,4	80	-	58,6	81	-	58,5	79	-
250	62,0	80	-	63,0	81	-	64,6	79	-
500	66,1	78	-	68,0	79	-	72,1	77	-
1000	71,5	75	-	71,5	76	-	73,4	74	-
2000	71,7	62	9,7	72,7	63	9,7	69,8	61	8,8
Ip (Caso 1) = 78 dB			Ip (Caso 2) = 79 dB			Ip (Caso 3) = 77 dB			



Quadro 7.14 - Valores medidos e cálculo de  $I_p$  do Caso 4 e Caso 5 (CR-curva de referência com a mesma numeração do caso em análise,  $\Delta$ -desvios com a mesma numeração do caso em análise)

Frequência (Hz)	Caso 4			Caso 5		
	$L_{pn}$ (dB)	CR4	$\Delta 4$	$L_{pn}$ (dB)	CR5	$\Delta 5$
125	60,2	77	-	58,6	77	-
250	61,4	77	-	59,7	77	-
500	65,8	75	-	64,6	75	-
1000	67,7	75	-	66,5	72	-
2000	68,6	59	9,6	68,1	59	9,1
<b><math>I_p</math> (Caso 4) = 75 dB</b>				<b><math>I_p</math> (Caso 5) = 75 dB</b>		

De forma a uma melhor percepção do ajuste à curva de referência, apresenta-se na figura 7.7 o processo de ajuste utilizado no caso 1 para o cálculo de  $I_p$ .

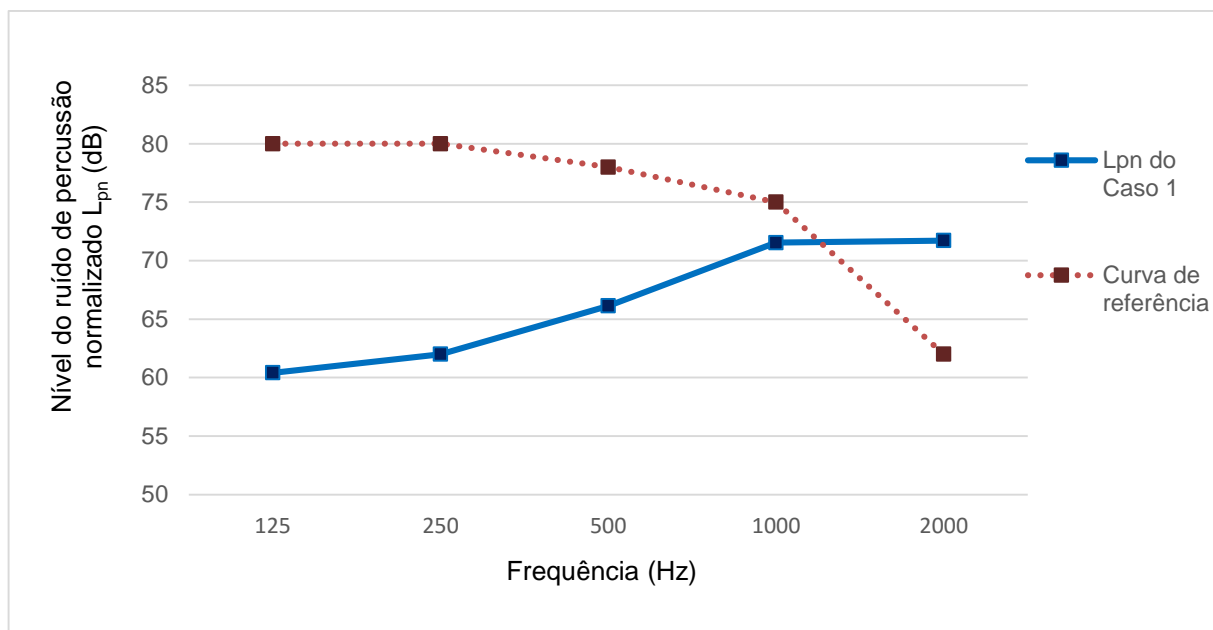


Figura 7.7 - Ajuste da curva dos níveis de pressão sonora normalizada (em bandas de 1/1 oitava) do Caso 1 à curva de referência

Depois de todos os cálculos realizados é efetuada a análise no quadro 7.15 do cumprimento da legislação portuguesa atual e já utilizada nos dois regulamentos anteriores.

Pela análise dos valores seguintes é possível tirar algumas conclusões, não só da qualidade de isolamento sonoro a ruídos de percussão que as salas possuem, como também ter a noção do efeito das sucessivas revisões do regulamento tiveram na legalidade destas salas.

Quadro 7.15 - Comparação de uso dos três regulamentos Portugueses em vigor ao longo dos anos

Caso em estudo	Limite regulamentar (RRAE 2008)	$L'_{nT,w} - 3$ (dB)	Limite regulamentar (RRAE 2002)	$L'_{n,w} - 3$ (dB)	Limite regulamentar RGR 1987	$L_p$ (dB)
	$L'_{nT,w}$ (dB) $\leq$		$L'_{n,w}$ (dB) $\leq$		$L_p$ (dB/oit.) $\leq$	
Caso 1		59		69		78
Caso 2		62		70		79
Caso 3	65	61	65	68	70	77
Caso 4		54		66		75
Caso 5		58		65		75

- Cumpre o regulamento      - Não cumpre o regulamento

É possível observar uma clara discrepância de cumprimento dos diferentes regulamentos. Com o uso do RGR de 1987 (esta análise tem particular interesse uma vez que era o regulamento em vigor na altura em que se procedeu à elaboração do projeto e à construção da faculdade) nenhuma das salas de aula analisadas cumpre os limites regulamentares. Ou seja, em fase de projeto o isolamento sonoro a ruídos de percussão ou foi mal dimensionado, ou por e simplesmente não foi tido em conta o que é incompreensível dado que a data de construção e de projeto é relativamente recente.

Analisando o cumprimento RRAE de 2002 verifica-se um cenário quase igual, uma vez que apenas no Caso 5, se verifica o cumprimento deste regulamento podendo-se observar que mesmo neste caso o valor obtido se encontra no limite do regulamentar.

Em todos os outros casos o limite regulamentar não é cumprido salientando-se mesmo o Caso 2 em que o valor  $L'_{n,w}$  obtido está 5 dB acima do máximo permitido em lei. Este valor anormalmente alto deve-se ao elevado nível de pressão sonora normalizado que este caso apresenta nas altas frequência comparativamente aos outros casos.

Usando o RRAE de 2008 todas as salas são capazes de cumprir o limite regulamentar, observando-se até uma folga considerável entre o valor obtido e o valor máximo que a legislação permite na maioria dos casos. O Caso 2 é aquele que mais se aproxima do limite regulamentar ficando ainda assim com menos 3 dB que o máximo permitido por esta lei.

É assim notória a maior facilidade de cumprimento do regulamento que as sucessivas revisões proporcionam para salas com esta ordem de grandeza de volumes.

Nos dois regulamentos mais recentes, a metodologia de cálculo é sensivelmente a mesma, sendo que a existência de diferenças significativas deve-se à normalização do nível de pressão sonora ( $L'_n$ ) para uma área de absorção sonora de referência de  $10m^2$  ( $A_0$ ) ou padronização do nível de pressão sonora ( $L'_{nT}$ ) para um tempo de reverberação de referência de 0,5s ( $T_0$ ). Só para compartimentos recetores com volume igual a  $32 m^3$  é que os valores dos dois regulamentos se igualam. Embora se considere que o uso de uma área de absorção de referência de  $10 m^2$  apresente resultados exagerados para volumes de elevadas dimensões, valores  $T_0$  de 0,5 s para todos os casos parece também desadequado e não

representativo da realidade. Em alguns países o valor de  $T_0$  pode apresentar valores de 2,5 s para compartimentos de grandes volumes.

Torna-se interessante por isso proceder a uma regressão linear os valores medidos de forma a perceber os valores que  $T_0$  deveria adotar de forma a obtermos valores equivalentes de  $L'_{nT,w}$  e  $L'_{n,w}$  (figura 7.8).

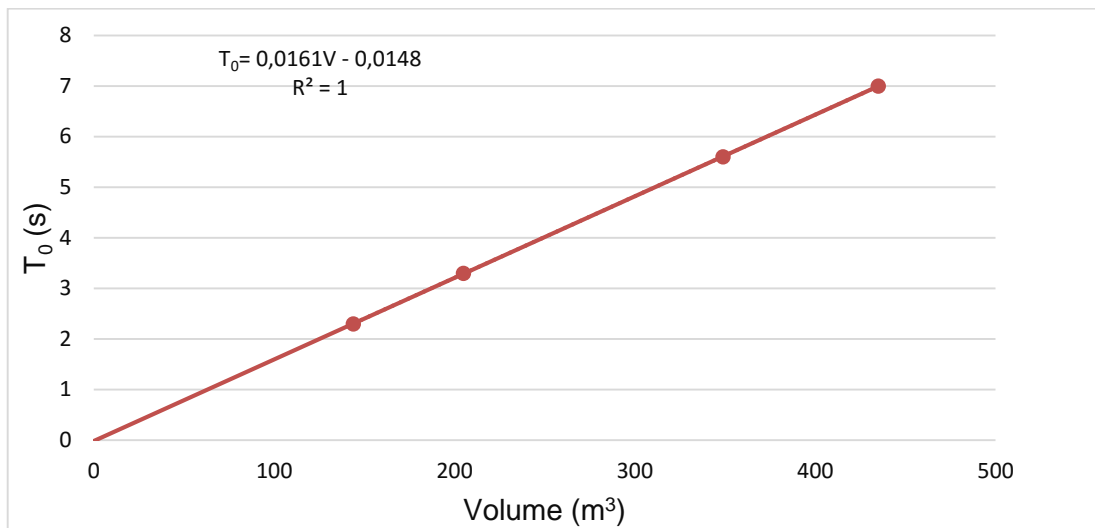


Figura 7.8 - Relação entre  $T_0$  e volume a usar de forma a obter  $L'_{nT,w}=L'_{n,w}$

No sentido de se avaliar o cumprimento da legislação americana calculam-se no quadro 7.16 os valores do índice FIIC dos casos de estudo.

Quadro 7.16 - Valores calculados do índice FIIC para cada um dos casos analisados

Caso	FIIC	110-FIIC	$L'_{n,w}$	FIIC+ $L'_{n,w}$
<b>Caso 1</b>	35	75	72	107
<b>Caso 2</b>	34	76	73	107
<b>Caso 3</b>	39	71	71	110
<b>Caso 4</b>	38	72	69	107
<b>Caso 5</b>	37	73	68	105

Normalmente quando se comparam valores de  $L'_{n,w}$  e FIIC considera-se que a soma dos dois índices é 110, pois a forma de cálculo de FIIC não é muito diferente da usada para determinação de  $L'_{n,w}$  no entanto a adoção da regra de que o desvio máximo positivo entre a curva dos níveis de pressão sonora normalizada e a curva de referência seja 8 dB altera um pouco os resultados de FIIC e a soma já não é 110. Nas somas efetuadas obtém-se um desvio considerável face aos 110, mostrando-se assim que comparar diretamente os dois índices sem uma análise das curvas dos níveis de pressão induz um erro significativo nas análises.

De forma a analisar o cumprimento das legislações estrangeiras apresenta-se no quadro 7.17 os resultados para cada país do isolamento sonoro a ruídos de percussão conforme a sua legislação em

vigor. No cálculo dos índices para cada país foram tidas em conta as regras específicas que cada país apresenta no cálculo do isolamento sonoro a ruídos de percussão.

Quadro 7.17 - Análise do cumprimento dos limites legislativos de isolamento sonoro a ruídos de percussão em salas de aula

País	Índice utilizado	Limite regulamentar para escolas	Resultados de cada caso analisado				
			Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
<b>Portugal</b>	$L'_{nT,w}$	$\leq 65$ dB	62 	65 	64 	57 	61 
<b>Espanha</b>	$L'_{nT,w}$	$\leq 65$ dB	62 	65 	64 	57 	61 
<b>Reino Unido</b>	$L'_{nT,w}$	$\leq 60$ dB	62 	65 	64 	57 	61 
<b>EUA</b>	FIIC	$\geq 40$	35 	34 	39 	38 	37 
<b>França</b>	$L'_{nT,w}$	$\leq 60$ dB	62 	65 	64 	57 	61 
<b>Suécia</b>	$L'_{n,w}$	$\leq 56$ dB	62 	65 	64 	57 	61 
	$L'_{n,w} + C_{l, 50-2500}$	$\leq 56$ dB	50 	53 	55 	47 	50 
<b>Itália</b>	$L'_{n,w}$	$\leq 58$ dB	72 	75 	71 	69 	68 
<b>Noruega</b>	$L'_{n,w}$	$\leq 53$ dB	67 	70 	69 	62 	66 
<b>Finlândia</b>	$L'_{n,w}$	$\leq 53$ dB	65 	68 	67 	60 	64 
<b>Austrália</b>	$L'_{nT,w}$	$\leq 55$ dB	62 	65 	64 	57 	61 



-Cumpre o regulamento



- Não cumpre o regulamento

Com a análise do quadro 7.17 é notória menor exigência que o regulamento português apresenta face aos demais, uma vez que apenas no regulamento português e espanhol todas as salas são cumpridoras. É de referir também que as salas apenas cumprem uma parte do regulamento sueco porque uma das condições existentes visa uma análise mais exigente de pavimentos leves que permitam a transmissão

de ruídos de percussão nas frequências mais baixas e não do tipo de pavimentos pesados que são analisados por este trabalho.

#### 7.4.2. USO DE UMA GAMA ALARGADA DE FREQUÊNCIAS

Nesta análise será estudado o alargamento das bandas de frequências usadas no cálculo do isolamento sonoro a ruídos de percussão, sendo que para isso se irá efetuar o cálculo de  $L'_{nT,w}$  e  $L'_{n,w}$  usando as bandas de terço de oitava compreendidas entre 50 e 5000 Hz em vez do uso de apenas as bandas compreendidas entre 100 e 3150 Hz que atrás foi efetuada. Para isso adotou-se uma curva de referência igual à curva anteriormente usada, mas estendendo-a, com a manutenção do declive, para as bandas de 50 a 5000 Hz. Assim a curva usada possui declive nulo entre as bandas de 1/3 de oitava de 50 a 315 Hz, declive decrescente de 1 dB entre os 315 e 1000 Hz e declive decrescente de 3 dB entre as bandas de 1 e 5 kHz.

Quadro 7.18 - Cálculo de  $L'_{nT,w}$  Caso 1 (B218/B017) com uma gama alargada de frequências

Freq. (Hz)	Lmédio corrigido (dB)	$L'_{nT}$ (dB)	CR2	$\Delta 2$
50	58,7	51,4	63	-
63	51,6	44,8	63	-
80	50,6	44,3	63	-
100	50,7	44,2	63	-
125	52,1	45,4	63	-
160	51,9	45,8	63	-
200	52,8	45,9	63	-
250	53,3	46,4	63	-
315	54,5	47,7	63	-
400	57,5	50,1	62	-
500	56,8	50,2	61	-
630	58,8	52,1	60	-
800	61,2	54,4	59	-
1000	63,2	56,6	58	-
1250	64,0	57,3	55	2,3
1600	61,1	54,4	52	2,4
2000	62,8	56,2	49	7,2
2500	61,6	55,4	46	9,4
3150	60,8	54,6	43	11,6
4000	53,0	46,9	40	6,9
5000	44,8	39,0	37	2,0
$\Sigma \Delta 2/21=$	1,99	$L'_{nT,w}=$	61	

Quadro 7.19 - Cálculo de  $L'_{nT,w}$  Caso 2 (B111/B016) usando uma gama alargada de frequências

Freq. (Hz)	Lmédio corrigido (dB)	$L'_{nT}$ (dB)	CR2	$\Delta 2$
50	56,5	49,5	67	-
63	54,6	48,9	67	-
80	54,3	49,1	67	-
100	51,0	45,7	67	-
125	51,6	45,1	67	-
160	51,8	46,1	67	-
200	54,4	48,6	67	-
250	54,8	49,0	67	-
315	57,5	51,8	67	-
400	59,4	53,6	66	-
500	60,3	54,9	65	-
630	61,3	56,3	64	-
800	63,7	58,6	63	-
1000	63,7	58,6	62	-
1250	63,7	58,6	59	-
1600	63,8	58,4	56	2,4
2000	64,0	58,9	53	5,9
2500	63,7	58,8	50	8,8
3150	62,9	58,0	47	11,0
4000	57,3	52,3	44	8,3
5000	48,6	44,0	41	3,0
$\Sigma \Delta 2/21=$	1,88	$L'_{nT,w}=$	65	

Quadro 7.20 - Cálculo de  $L'_{nT,w}$  Caso 3 (B215/B109) com uma gama alargada de frequências

Freq. (Hz)	Lmédio corrigido (dB)	$L'_{nT}$ (dB)	CR2	$\Delta 2$
50	61,1	52,20	66	-
63	56,7	49,70	66	-
80	52,7	47,00	66	-
100	51,3	45,40	66	-
125	54,1	47,00	66	-
160	55,3	48,40	66	-
200	55,7	49,10	66	-
250	56,2	49,80	66	-
315	62,5	56,60	66	-
400	66,5	60,10	65	-
500	66,4	60,30	64	-
630	67,4	61,60	63	-
800	68,4	62,90	62	0,9
1000	67,1	62,10	61	1,1
1250	65,7	60,60	58	2,6
1600	64,1	58,70	55	3,7
2000	63,2	57,80	52	5,8
2500	61,6	56,60	49	7,6
3150	59,3	54,20	46	8,2
4000	54,4	49,40	43	6,4
5000	46,5	41,80	40	1,8
$\Sigma \Delta 2/21=$		1,81	$L'_{nT,w}=$	64

Quadro 7.21 - Cálculo de  $L'_{nT,w}$  Caso 4 (B317/B215) usando uma gama alargada de frequências

Freq. (Hz)	Lmédio corrigido (dB)	$L'_{nT}$ (dB)	CR2	$\Delta 2$
50	58,1	48,9	61	-
63	59,0	51,3	61	-
80	53,3	47,1	61	-
100	52,3	44,7	61	-
125	51,4	43,0	61	-
160	52,1	44,2	61	-
200	50,6	43,0	61	-
250	52,3	45,0	61	-
315	54,1	46,9	61	-
400	57,3	49,9	60	-
500	55,7	48,7	59	-
630	56,8	50,2	58	-
800	57,0	50,7	57	-
1000	57,7	51,8	56	-
1250	57,6	51,7	53	-
1600	55,7	49,4	50	-
2000	58,1	51,8	47	4,8
2500	58,3	52,3	44	8,3
3150	56,5	50,5	41	9,5
4000	53,8	47,8	38	9,8
5000	48,7	43,2	35	8,2
$\Sigma \Delta 2/21=$		1,93	$L'_{nT,w}=$	59

Quadro 7.22 - Cálculo de  $L'_{nT,w}$  Caso 5 (B319/B216) usando uma gama alargada de frequências

Freq. (Hz)	Lmédio corrigido (dB)	$L'_{nT}$ (dB)	CR2	$\Delta 2$
50	60,8	52,3	65	-
63	55,4	48,6	65	-
80	57,2	51,9	65	-
100	54,5	48,3	65	-
125	51,6	45,5	65	-
160	53,9	47,5	65	-
200	52,6	46,4	65	-
250	53,8	47,6	65	-
315	56,4	50,1	65	-
400	57,5	51,1	64	-

<b>500</b>	58,4	52,3	63	-
<b>630</b>	60,7	55,2	62	-
<b>800</b>	60,2	55,1	61	-
<b>1000</b>	60,9	55,9	60	-
<b>1250</b>	59,3	54,3	57	-
<b>1600</b>	56,5	51,1	54	-
<b>2000</b>	61,3	55,8	51	4,8
<b>2500</b>	62,2	57,0	48	9,0
<b>3150</b>	61,2	56,2	45	11,2
<b>4000</b>	58,2	53,1	42	11,1
<b>5000</b>	46,6	41,8	39	2,8
<b><math>\Sigma \Delta 2/21 =</math></b>	<b>1,85</b>	<b><math>L'_{nT,w} =</math></b>	<b>63</b>	

Apresenta-se no quadro 7.23 a comparação para cada caso do valor obtido considerando 16 bandas de frequências de terço de oitava conforme a legislação em vigor (utilizando as bandas de frequências entre 100 Hz e 3,15 kHz) e utilizando as 21 bandas de terço de oitava entre 50 Hz e 5000 Hz.

Quadro 7.23 - Comparação de  $L'_{nT,w}$  usando 16 ou 21 bandas de frequências ( $\Delta = L'_{nT,w}$  (com 21 bandas de frequências) -  $L'_{nT,w}$  (com 16 bandas de frequências))

<b>Caso</b>	<b>Volume recetor (m<sup>3</sup>)</b>	<b><math>L'_{nT,w}</math> com 16 bandas de frequência (100 – 3150 Hz)</b>	<b><math>L'_{nT,w}</math> com 21 bandas de frequências (50 – 5000 Hz)</b>	<b><math>\Delta</math> (dB)</b>
<b>Caso 1</b>	349	62	61	-1
<b>Caso 2</b>	205	65	65	0
<b>Caso 3</b>	144	64	64	0
<b>Caso 4</b>	435	57	59	+2
<b>Caso 5</b>	144	61	63	+2

Conforme se pode verificar pelo quadro 7.23 para o tipo de lajes analisadas existem diferenças entre a utilização de 16 ou 21 bandas de frequências de um terço de oitava.

As principais diferenças observadas entre os dois valores depende sobretudo da transmissão de ruídos de percussão nos 4 kHz e nos 5 kHz que quando apresentam valores elevados fazem com que a curva de referência suba e o valor final de  $L'_{nT,w}$  vai ser mais elevado como acontece nos Casos 4 e 5, pelo contrário quando existe uma pequena transmissão de ruídos de percussão nas bandas de 4 e 5 kHz a curva de referência vai descer e o valor final de  $L'_{nT,w}$  vai ser menor (Caso 1). Existem no entanto dois Casos (Caso 2 e Caso 3) em que não existe qualquer diferença no valor do índice.

Esta maior importância das elevadas frequências adicionadas acontece sobretudo devido ao tipo de laje e revestimentos presentes (construção pesada), assim como o tipo de ruído produzido pela máquina normalizada (a máquina de percussão). Se o tipo de elemento separador fosse mais leve era de supor que algumas diferenças provenientes das bandas de frequências mais baixas também se denotassem.

Assim não se pode afirmar que um método seja mais permissivo que outro, podendo-se no entanto dizer que o uso de um maior número de frequências no cálculo do isolamento sonoro a ruídos de percussão permite a análise mais fiável e abrangente do ruído que realmente atravessa um elemento construtivo. Há que salientar que as frequências adicionadas são muito importantes para o uso que estas salas têm, uma vez que as palavras proferidas pelos humanos têm letras que são emitidas nestes intervalos de frequências.

#### 7.4.3. ANÁLISE DO EFEITO DO VOLUME DO COMPARTIMENTO RECETOR

Todos os casos analisados fazem parte do mesmo edifício existindo em todos o mesmo tipo de elemento separador (revestimento de pavimento, laje e teto falso sem material absorvente) entre as salas emissoras e recetoras e o mesmo tipo de paredes na envolvente (importantes nas transmissões marginais). Seria de esperar que se nenhuma outra propriedade intervisse (salvo a existência de eventuais erros na execução da obra) os níveis de pressão sonora medidos nas salas recetoras e posteriores índices de isolamento sonoro calculados, fossem semelhantes em todos os casos. Ora isso não acontece e é efetuada uma correção em função do valor do tempo de reverberação medido ( $L'_{nT,w}$ ) ou da área de absorção sonora ( $L'_{n,w}$ ) ambos do compartimento recetor. No entanto outras propriedades da sala recetora podem afetar o nível de pressão sonora medido e para que se proceda a uma boa comparação entre os diferentes tipos de espaços recetores importa estudar todas essas propriedades.

Aqui é estudada a forma como o volume do compartimento recetor afeta o nível de pressão sonora medido resultante da ação da máquina de impactos normalizada na sala emissora. É sabido que o ar desempenha um papel de atenuador da propagação do som ao ar livre, no entanto não é conhecida a exata relação que existe entre volume de ar de um compartimento e a medição dos ruídos de percussão. As características da sala recetora não têm influência na transmissão dos ruídos de percussão no entanto poderão alterar significativamente o nível de pressão sonora aí criado.

Começa-se então por comparar os resultados obtidos para os níveis de pressão sonora padronizados (figura 7.9) medidos nas diferentes salas recetoras.

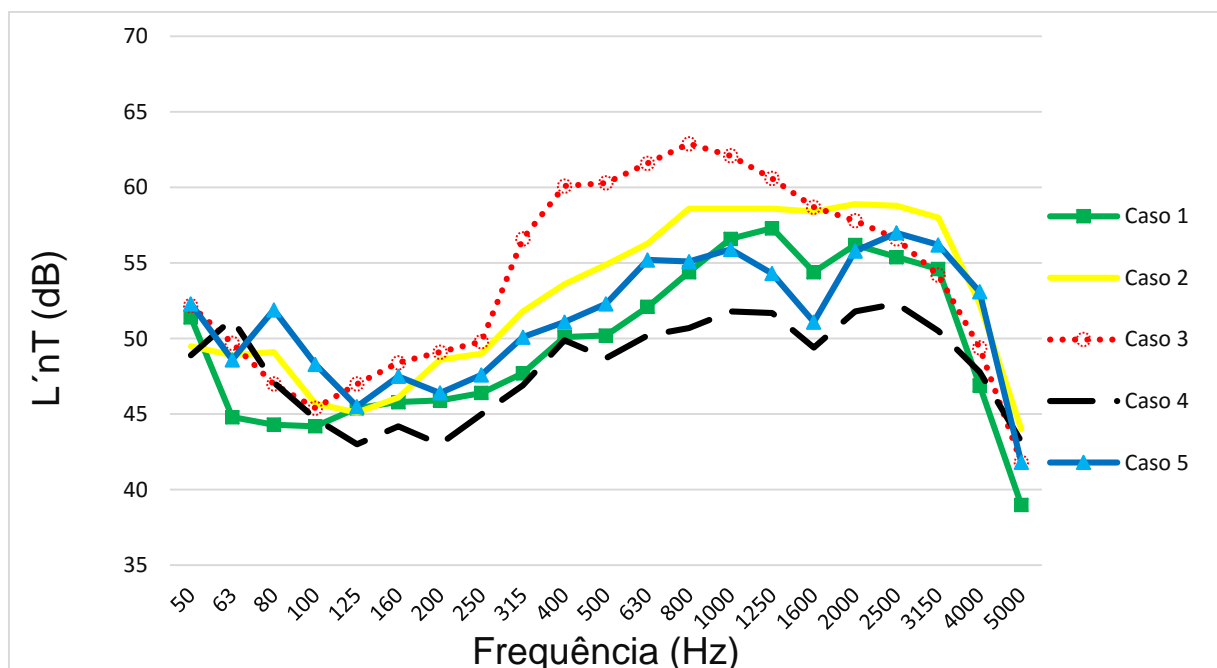


Figura 7.9 - Valores de  $L'_{nT}$  obtidos para cada um dos casos medidos na FEUP



Analisando os níveis de pressão sonora médios obtidos na figura 7.9 observa-se que o Caso 3 (um dos casos em que a sala recetora tinha menor volume) sobressai como caso em que o nível de pressão sonora nas médias frequências é claramente superior a todos os outros casos indicando possíveis falhas na construção ou influência da localização da sala.

Este caso possui o maior nível de pressão sonora medido que tem o valor de 63 dB e ocorre na banda de frequências dos 800 Hz. Pelo contrário a sala recetora de maior volume (435 m<sup>3</sup>) utilizada no Caso 4 é a que na maioria das frequências possui menor nível de pressão sonora. Nos restantes casos não existe uma tendência definida sobre a diferença de níveis de pressão sonora observando-se níveis muito próximos nas diferentes frequências.

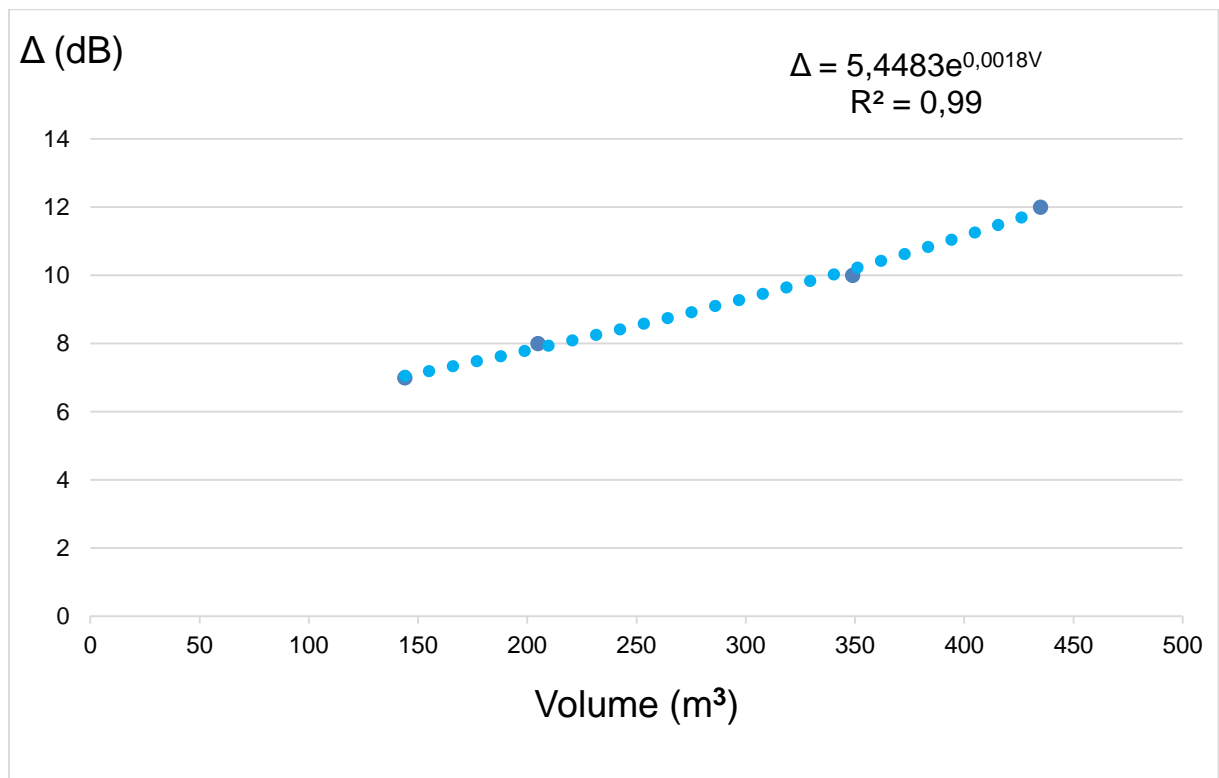


Figura 7.10 – Diferenças (Δ) entre os valores de  $L'_{nT,w}$  e  $L'_{n,w}$

De acordo com a figura 7.10 é possível constatar que as significativas diferenças entre os valores de  $L'_{nT,w}$  e  $L'_{n,w}$  têm como base as diferenças de volume existentes nas salas. Verifica-se uma diferença de 12 dB nos casos de maior volume das salas enquanto nas salas mais pequenas a diferença é de 7 dB.

Como o nível de pressão sonora normalizado calculado tem uma grande influência do volume recetor, o estudo do efeito do volume do compartimento recetor na medição dos níveis pressão resultantes do impacto da máquina de percussão não pode ser feita usando estes valores. Os valores padronizados dos níveis de pressão sonora por seu lado não apresentam uma dependência do volume do compartimento. Assim na figura 7.11 representa-se a variação do isolamento sonoro a ruídos de percussão padronizado com o volume do compartimento recetor.

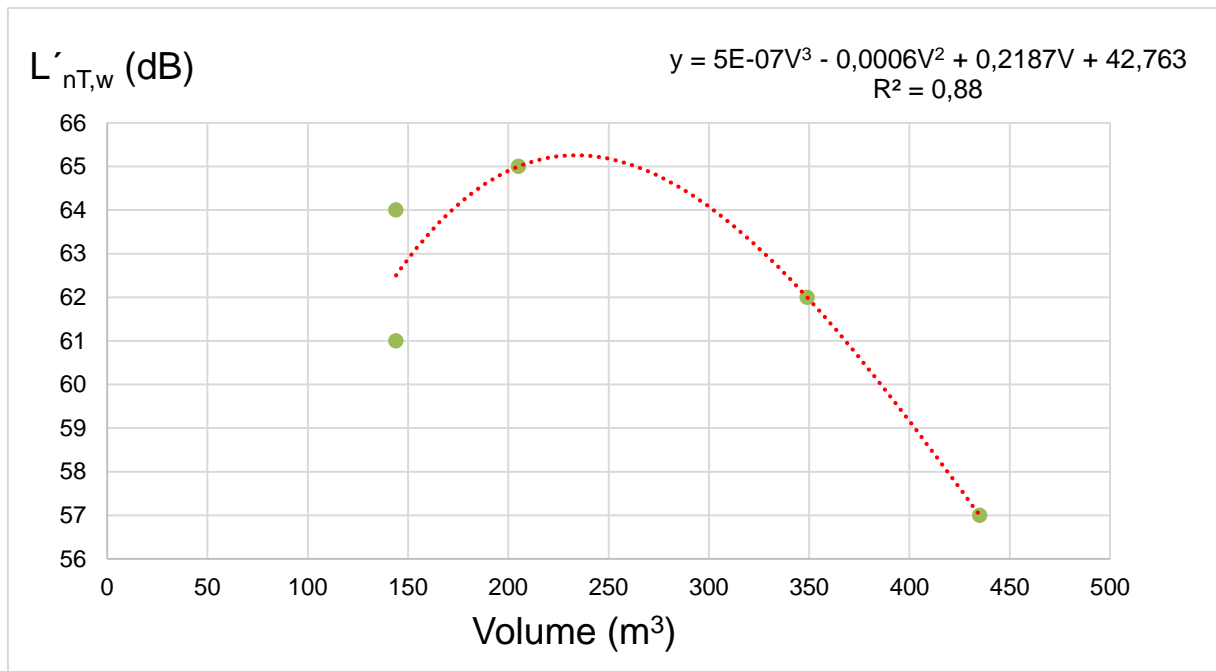


Figura 7.11 - Variação de  $L'_{nT,w}$  com o volume do compartimento recetor

A figura 7.11 mostra uma diminuição do índice de isolamento sonoro a ruídos de percussão para volumes elevados, o que parece demonstrar que o volume de ar existente numa sala tem um efeito positivo na forma determinação do isolamento sonoro a ruídos de percussão. Esta hipótese é condizente com aquilo que ocorre em campo livre pelo que o cálculo um tempo de reverberação de referência de 0,5 s para todos os volumes não tem em conta o efeito que o volume de ar provoca no ensaio.

Esta tendência não é observada no entanto em todos os volumes analisados obrigando a que sejam tomadas reservas quanto se procura uma tendência clara.

#### 7.4.4. PROPOSTA DE MELHORIA

Depois da análise feita ao isolamento sonoro a ruídos de percussão salas de aula da FEUP concluiu-se que todas as salas analisadas cumprem o atual regulamento português, no entanto também se verificou que o regulamento português atual é bastante permissivo comparado com o utilizado em outros países (dos nove regulamentos internacionais analisados apenas no regulamento espanhol todas as salas cumprem os requisitos impostos).

Entende-se por isso que a qualidade acústica das salas não está totalmente assegurada com estes valores, sendo aconselhável a execução de uma solução de melhoria acústica. As melhores formas de aumentar o isolamento sonoro a ruídos de percussão são atuar sobre o pavimento (atuação na fonte), no entanto a maioria das soluções implicaria elevados custos que, para esta situação, não seriam justificáveis uma vez que o isolamento sonoro a ruídos de percussão não sendo bom também não é péssimo.

De forma a fazer uma proposta ajustada às necessidades e condicionantes do local entende-se que a melhor solução para o caso é a aplicação de um teto suspenso com material absorvente no tardo da caixa de ar e suspensores anti-vibráticos. Esta solução torna-se ainda mais interessante uma vez que as salas de aula da FEUP já possuem tetos suspensos sem qualquer tipo de material absorvente, sendo

possível utilizar esta estrutura que atualmente se encontra desaproveitada do ponto de vista acústico uma vez que o teto suspenso em material absorvente não influencia o isolamento sonoro.

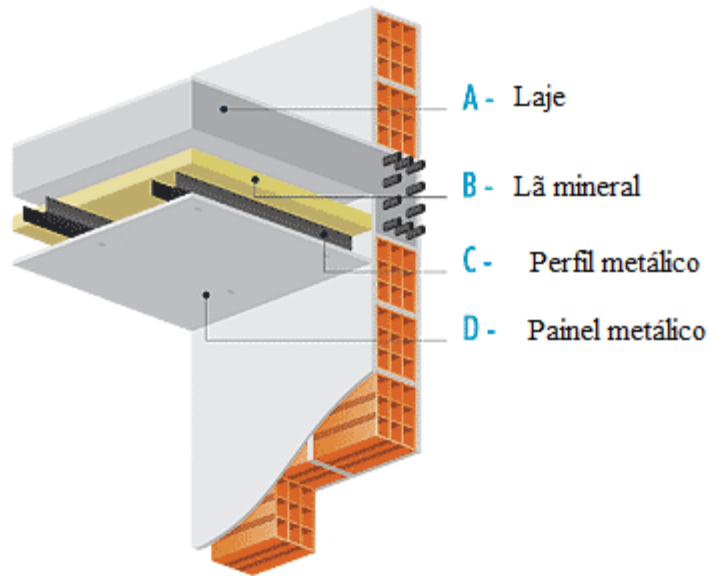


Figura 7.12 - Teto suspenso com colocação de painéis de lã mineral na caixa de ar [70]

O material absorvente recomendado de acordo com as exigências necessárias são painéis de lã mineral com espessura de 40 mm. Esta solução construtiva aumenta o isolamento sonoro a ruídos de percussão em cerca de 8 dB, fazendo com que as salas de aula passem a ter condições acústicas bastante mais favoráveis.



## 8

## CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 8.1. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo principal o estudo do isolamento sonoro a ruídos de percussão em salas de aula, tendo-se utilizado as salas da FEUP como estudo experimental.

O estudo efetuado pode-se dividir maioritariamente em duas fases. A primeira em que se procedeu à medição de todos os parâmetros necessários à avaliação do isolamento sonoro a ruídos de percussão (mediu-se o volume das salas, o tempo de reverberação, o ruído de fundo, todos estes parâmetros das salas recetoras, e o nível de pressão sonora que atravessa uma laje que separa um compartimento emissor, onde se coloca em funcionamento a máquina de percussão normalizada, e um compartimento recetor onde se procede à medição do nível de pressão sonora). E uma segunda fase em que se procedeu aos cálculos necessários.

Da análise dos dados obtidos observou-se que:

- Nenhuma das salas da FEUP cumpre o regulamento que estava em vigor à data da sua construção e projeto, o que tendo em conta que o edifício é relativamente recente e não houve nenhuma alteração construtiva ao nível das lajes e revestimentos de piso é um indício que a acústica das salas foi descorada;
- A última alteração produzida no regulamento Português de acústica de edifícios (RRAE de 2008) introduziu mudanças (substituição do parâmetro  $L'_{n,w}$  pelo parâmetro  $L'_{nT,w}$ ) que alteram a avaliação do isolamento sonoro a ruídos de percussão, pois não foi alterado o limite regulamentar fazendo com que as condições para o cumprimento do regulamento fossem bastante mais fáceis. Este já era um facto sabido (a diferença entre os dois parâmetros cresce com o aumento do volume), no entanto foi possível denotar que a alteração promovida afeta drasticamente o resultado entre o legal e o não legal neste tipo de situações. Enquanto apenas uma das salas cumpria o RRAE de 2002, já com o RRAE de 2008 todas as salas passaram a estar dentro dos limites regulamentares;
- O limite regulamentar português é bastante menos exigente que na maioria dos países analisados;
- O alargamento do número de bandas de frequências adotadas no cálculo promove algumas alterações no resultado obtido para o parâmetro  $L'_{nT,w}$  uma vez que os valores registados em algumas lajes nas bandas de 4 e 5 kHz encontravam-se relativamente altos fazendo com que a curva de referência subisse até 2 dB, diminuindo o resultado do isolamento medido. Num outro

caso em que os valores das bandas de 4 e 5 Hz eram mais baixos a curva de referência desceu 1 dB;

- O volume do compartimento recetor parece ter influência no valor de isolamento medido, assim como o tempo de reverberação. O aumento do volume do compartimento recetor parece diminuir nível de pressão sonora medido e assim aumentar o valor do isolamento sonoro a ruídos de percussão.

## **8.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

Por forma a completar o trabalho e torna-lo mais abrangente seria interessante:

- Estudar a influência conjunta do tempo de reverberação e do volume do compartimento recetor. Para isso utilizar compartimentos recetores com iguais volumes e diferentes tempos de reverberação. Noutra amostra dever-se-ia utilizar compartimentos com o mesmo tempo de reverberação, mas com volumes diferentes. Com esta variação seria interessante a análise dos resultados;
- Estudar a relação entre os métodos subjetivos e objetivos de medição do isolamento sonoro a ruídos de percussão;
- Fazer este tipo de ensaios acústicos noutras escolas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Carvalho, António P. O. *Acústica Ambiental e de Edifícios*, ed. 8.8. FEUP, Porto, 2014.
- [2] Everest, F. A., Pohlmann, K. C. *Master Handbook of Acoustics*, ed. 5. M. G. Hill, New York, 2009.
- [3] Brüel, Kjær &. *Basic Concepts of Sound*, Brüel & Kjær, 1998.
- [4] Maqbool, M., Suhail, M. *Textbook of Ear, Nose and Throat Diseases*, JP Medical Ltd, 2013.
- [5] Variação de pressão, <http://paginas.fe.up.pt/~earpe/conteudos/ARE/Apontamentosdadiiplina.pdf>, acedido a 25/04/2015.
- [6] Brüel, Kjær &. *Basic Frequency Analysis of Sound*, Brüel & Kjær, 1998.
- [7] Instituto do Ambiente *O ruído e a Cidade*, Ministério das Cidades, Ordenamento do Território e Ambiente, Lisboa, 2004.
- [8] Pressão eficaz (RMS), <http://www.castlegroup.co.uk/sound-pressure-level>, acedido a 3/04/2015.
- [9] López, Manuel Recuero, *Acústica Arquitectonica Aplicada*, Editorial Paraninfo, Madrid, 1999.
- [10] Velocidade do som, [http://profs.ccems.pt/PaulaFrota/velocidade\\_luz\\_som.htm](http://profs.ccems.pt/PaulaFrota/velocidade_luz_som.htm), acedido a 4/04/2015.
- [11] ISO 10534-1:1996 *Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes - Part 1: Method using standing wave ratio*, 1996.
- [12] NP EN ISO 354:2007 *Acústica de laboratório: Medição da absorção sonora em câmara reverberante*, 2007.
- [13] Materiais absorventes (fibras e membranas), <http://www.homexpert.com.br/areareservada/wp-content/uploads/2011/06/materiais-ac%C3%B4sticos.pdf> acedido a 7/04/2015.
- [14] EN ISO 11654:1997 *Acoustics - Sound absorbers for use in buildings - Rating of sound absorption*, 1997.
- [15] Bom isolamento acústico, <http://www.ingegnerialeale.com/servizi-ai-professionisti/requisiti-acustici-passivi-degli-edifici-dpcm-5-12-97/>, acedido a 3/05/2015.
- [16] Rasmussen, Birgit, Rindel, Jens Holger *Sound insulation between dwellings - Descriptors applied in building regulations in Europe*, Applied Acoustics, 2010.
- [17] ISO 717:1968 *Rating of sound insulation for dwellings*, 1968.
- [18] ISO 717:1982 *Acoustics - Rating of sound insulation in buildings and of building elements*, 1982.
- [19] ISO 717:1996 *Acoustics - Rating of sound insulation in buildings and of building elements*, 1996.
- [20] Máquina de percussão, <http://www.bksv.es/Products/transducers/acoustic/sound-sources/tapping-machine-3207>, acedido a 24/04/2015.
- [21] NP EN ISO 140-7:2008 *Acústica. Medição do isolamento sonoro de edifícios e de elementos de construção. Parte 7: Medição, in situ, do isolamento sonoro a sons de percussão*, 2008.
- [22] EN ISO 10140-3:2010 *Acoustics - Laboratory measurement of sound insulation of building elements - Part 3: Measurement of impact sound insulation*, 2010.
- [23] DL 96/2008, *Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios*, Diário da Republica, 2008.
- [24] DL 129/2002, *Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios*, Diário da Republica, 2002.

- [25] NP EN ISO 717-2:2013 *Acústica. Determinação do isolamento sonoro em edifícios e de elementos de construção. Parte 2: Isolamento sonoro a sons de percussão*, 2013.
- [26] EN ISO 10140-1:2010 *Acoustics. Laboratory measurement of sound insulation of building elements. Part 1: Application rules for specific products*, 2010.
- [27] ASTM E 989:2012 *Standard Classification for Determination of Impact Insulation Class (IIC)*, 2012.
- [28] ASTM E 492:2009 *Standard Test Method for Laboratory Measurement of Impact Sound Transmission through Floor/Ceiling Assemblies using the Tapping Machine*, 2009.
- [29] Gösele, K. *Zur Bewertung der Schalldämmung von Bauteilen nach Sollkurven*. Acta Acustica united with Acustica, 1965.
- [30] Liebl, A., Späh, M., Leistner, P. *Project Report No. 4: Correlation analysis of subjective and objective parameters. WoodWisdom-Net: AcuWood - Acoustics in Wooden Buildings*, 2014.
- [31] Fasold, W. *Untersuchungen über den Verlauf der Sollkurve für den Trittschallschutz im Wohnungsbau*, Acta Acustica united with Acustica, 1965.
- [32] Bodlund, K. *Alternative reference curves for evaluation of the impact sound insulation between dwellings*. Journal of Sound and Vibration, 1985.
- [33] Hopkins, Carl *Sound insulation*, Routledge, 2012.
- [34] Hagberg, Klas *Evaluating field measurements of impact sound*, Building Acoustics, 2010.
- [35] Tachibana, Hideki *et al. Development of new heavy and soft impact source for the assessment of floor impact sound insulation of buildings*, 1998.
- [36] ISO 16283-2 *Acoustics - Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 2: Impact sound insulation*.
- [37] Mateus, Diogo *Influência do ruído aéreo gerado pela percussão de pavimentos na determinação de  $L'_{n,w}$* , Contraruído - Acústica e Controlo de Ruído, Coimbra, 2005.
- [38] Rasmussen, Birgit, Rindel, Jens Holger *Concepts for evaluation of sound insulation of dwellings - from chaos to consensus?*, 2005.
- [39] Rasmussen, Birgit, Machimbarrena, María *Building acoustics throughout Europe Volume 1: Towards a common framework in building acoustics throughout Europe*, 2014.
- [40] Transmissão de ruídos de percussão, <http://www.gov.scot/Publications/2005/03/20901/55206>, acedido a 15/05/2015.
- [41] EN ISO 12354-2:2000 *Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements. Part 2: Impact sound insulation between rooms*, 2000.
- [42] Smith, S. *et al. Housing and sound insulation*, Scottish Building Standards agency.
- [43] Gerasimov, A., Malygina, E. *Calculation of reduction of impact sound level by the covering floors with regard to the change of dynamic stiffness of materials due to the frequency*.
- [44] Alcatifa, <http://greensavers.sapo.pt/2014/04/07/as-alcatifas-vao-voltar-as-nossas-casas-com-video/>, acedido a 25/04/2015.
- [45] Sousa, Nelson Ricardo Vieira de *Caracterização do comportamento acústico a sons de percussão de soluções à base de espumas de poliuretano*, Dissertação de Mestrado, FEUP, 2012.



- [46] Piso flutuante, <http://blog.newtonpaiva.br/pos/e8-eng18/> acedido a 16/05/2015.
- [47] Teto suspenso, [http://www.civil.uminho.pt/lftc/Textos\\_files/construcoes/cp2/Cap.%20XVI%20-%20Revestimento%20Interiores%20de%20Tectos.pdf](http://www.civil.uminho.pt/lftc/Textos_files/construcoes/cp2/Cap.%20XVI%20-%20Revestimento%20Interiores%20de%20Tectos.pdf), acedido a 19/05/2015.
- [48] Building Bulletin 93, *Acoustic Design of schools a Design guide*.
- [49] Lukas, Jerome Stephen, Dupree, RB *Effects of noise on academic achievement and classroom behavior*, 1981.
- [50] Seidel, Jochen *et al. Acoustic properties in German class rooms and their effect on the cognitive performance of primary school pupils. Measurement*, 2005.
- [51] Alarcão, D. *et al. Acústica de salas de aula*, Coimbra, 2008.
- [52] McSporrán, Eileen, *Towards better listening and learning in the classroom*, Educacional Review, 1997.
- [53] Feuerstein, James F., *Monaural versus Binaural Hearing: Ease of Listening, Word Recognition, and Attentional Effort*, 1992.
- [54] Dreossi, Raquel, Santos, Teresa *A interferência do ruído na aprendizagem*, 2004.
- [55] Angelillo, Italo Francesco *Prevalence of occupational voice disorders in teachers*, Journal of preventive medicine and hygiene, 2015.
- [56] Pick JR, Herbert *et al. Inhibiting the Lombard effect*, The Journal of the Acoustical Society of America, 1989.
- [57] Roy, Nelson *et al. Prevalence of voice disorders in teachers and the general population*. Journal of Speech, Language, and Hearing Research, 2004.
- [58] Malefícios do ruído para os professores, <http://www.ufrrj.br/institutos/it/de/acidentes/voz2.htm> acedido a 21/05/2015.
- [59] Decreto Legislativo Regional 22/83/A *Poluição Sonora*, Diário da República, 1983.
- [60] DL 251/87 *Regulamento Geral sobre o Ruído*, Diário da República, 1987.
- [61] DB-HR *Código Técnico de la Edificación – Protección frente al ruido*, Real Decreto, 2007.
- [62] BB 93 *Acoustic Design of Schools: Building Bulletin 93*, 2003.
- [63] BS EN ISO 140-7:1998 *Acoustics. Measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Field measurements of impact sound insulation of floors*, 1998.
- [64] ANSI/ASA S12.60:2010 *American National Standard Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools*, 2010.
- [65] ASTM E 1007:2014 *Standard Test Method for Field Measurement of Tapping Machine Impact Sound Transmission Through Floor-Ceiling Assemblies and Associated Support Structures*, 2014.
- [66] Arrêté du 25 avril 2003 *relatif à la limitation du bruit dans les établissements de santé*, 2003.
- [67] SS 25268, *Byggakustik - Ljudklassning av utrymmen i byggnader – Vårdlokaler, undervisningslokaler, dag- och fritidshem, kontor och hotel*, 2007.
- [68] Hagberg, Klas, Rasmussen, Birgit *Impact sound insulation descriptors in the Nordic building regulations - Overview special rules and benefits of changing descriptors*, 2010.

[69] Planta da Feup, <http://paginas.fe.up.pt/~jupiter/docs/plantas.html> acedido a 2/05/2015.

[70] Teto falso, <http://www.imperialum.com/?solucoes=tectos-falsos-em-gesso-cartonado>, acedido a 4/05/2015.